



# REVUE TECHNIQUE

GUIDE PRATIQUE POUR  
LES ESSAIS DE POMPAGE DE PUIITS



CICR

RÉFÉRENCE



**CICR**

Comité international de la Croix-Rouge

19, avenue de la Paix

1202 Genève, Suisse

T +41 22 734 60 01 F +41 22 733 20 57

E-mail: [shop@icrc.org](mailto:shop@icrc.org) [www.icrc.org](http://www.icrc.org)

© CICR, septembre 2011

Photo de couverture: Christian Farnsworth/CICR

# **REVUE TECHNIQUE**

**GUIDE PRATIQUE POUR  
LES ESSAIS DE POMPAGE DE PUIITS**



# PRÉFACE

Les recommandations pratiques présentées dans ce guide sur les essais de pompage reflètent des années d'expériences acquises sur le terrain lors de l'exploitation de forages dans des contextes ruraux et urbains, de l'Afrique à l'Asie, en passant par le Moyen-Orient.

Travaillant en étroite coopération avec l'équipe « eau et habitat » de la délégation régionale du Comité international de la Croix-Rouge (CICR) à Nairobi, Richard Boak – l'hydrogéologue et ingénieur expérimenté qui est l'auteur de cette publication – trouve le bon équilibre entre les informations théoriques et pratiques. Il ne fait aucun doute que son travail sera d'une grande aide aux ingénieurs « eau et habitat » du CICR pour faire face aux dilemmes techniques rencontrés sur le terrain dans des conditions difficiles.

Dans les régions en proie à un conflit armé ou à de fortes tensions où travaillent les ingénieurs du CICR, l'eau est souvent un problème, et la meilleure source d'eau potable est souvent la nappe phréatique. Une bonne connaissance de la technique de forage, ainsi qu'une analyse complète de la situation locale qui place la dignité humaine et les besoins de la communauté au premier plan tout en tenant compte de préoccupations environnementales plus vastes, est un élément clé de la réussite de toute opération visant à trouver des solutions durables et économiques pour la population.

Dans la nouvelle série des « références » publiées par le CICR, cette publication est la seconde qui soit consacrée à l'eau et à l'habitat. Avec l'ouvrage intitulé « Guide pratique pour la réalisation de forages et leur réhabilitation », elle constitue un ensemble de références essentiel pour les ingénieurs du CICR travaillant sur le terrain. Ce « Guide pratique pour les essais de pompage de puits » est une contribution importante qui s'inscrit dans les efforts déployés par l'Unité eau et habitat du CICR pour promouvoir de bonnes pratiques sur le terrain, parmi ses collaborateurs et auprès d'autres acteurs humanitaires.

Je suis extrêmement reconnaissant à Laurent Wismer, ancien ingénieur « eau et habitat » à la délégation régionale de Nairobi, de la contribution qu'il a apportée à cette publication, ainsi qu'à Jean Vergain et Thomas Nydegger, hydrogéologues qualifiés, qui nous ont donné des conseils précieux tout au long de la rédaction de ce texte.

**Philippe Dross**

Responsable de l'Unité eau et habitat  
Comité international de la Croix-Rouge

## Abrégé

L'eau souterraine est souvent considérée comme la ressource la plus appropriée d'eau potable, et ses réserves sont amenées à la surface en réhabilitant des puits ou en creusant de nouveaux forages. Les essais de pompage sont un moyen pratique de se faire une idée de l'efficacité du forage et de sa productivité optimale. Une grande partie des connaissances spécialisées et du savoir technique nécessaires peuvent être tirés de la littérature en la matière. Toutefois, les opérations sur le terrain dans des régions éloignées ou dans des conditions difficiles exigent souvent de la souplesse et de l'imagination pour éviter ou résoudre les problèmes techniques. Ce guide se veut essentiellement un outil pratique et contient donc un minimum de théorie. Il est destiné aux ingénieurs du domaine de l'eau et de l'habitat travaillant sur le terrain qui réalisent ou surveillent des programmes de forage ou de réhabilitation de puits et qui ne sont pas familiarisés avec les procédures des essais de pompage. Le résultat final devrait être une installation à la fois efficace et économique, en mesure de fournir de l'eau potable pendant de nombreuses années.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>9</b>
Cadre général	10
But	10
Limites des essais de pompage	12
Terminologie et lectures	12
<b>2. NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES ESSAIS DE POMPAGE</b>	<b>13</b>
Qu'est-ce qu'un essai de pompage ?	14
Pourquoi réaliser un essai de pompage ?	14
Principaux types d'essais de pompage	16
<b>3. PRÉPARATIFS DE L'ESSAI DE POMPAGE</b>	<b>17</b>
Introduction	18
Équipement d'observation de base	18
Autre équipement disponible	22
Récolte d'informations	23
Hygiène et eau	28
Surveillance de la qualité de l'eau	29
<b>4. ESSAI PAR PALIERS</b>	<b>33</b>
Introduction	34
Équipement et limites	35
Déroulement de l'essai par paliers	37
Analyse et interprétation	38

<b>5. ESSAI À DÉBIT CONSTANT</b>	<b>47</b>
Introduction	48
Équipement et limites	48
Déroulement de l'essai à débit constant	52
Analyse et interprétation	53
<b>6. ESSAI DE REMONTÉE</b>	<b>59</b>
Introduction	60
Équipement et limites	61
Déroulement de l'essai de remontée	63
Analyse et interprétation	63
Essai de puisage	67
<b>7. COMMENTAIRES FINAUX</b>	<b>69</b>
Puits de grand diamètre	70
Choix de l'essai de pompage	71
Gestion des entrepreneurs	74
Erreurs courantes	74
Suivi à long terme	75
<b>ANNEXES</b>	<b>77</b>
A Glossaire	78
B Liste des photos	80
C Liste des figures et des tableaux	80
D Références et lectures	81
E Formulaires standard	84
F Essai de puisage	92
G Liste de contrôle pour la supervision des entrepreneurs	100





# **1. INTRODUCTION**

## Cadre général

Le Comité international de la Croix-Rouge (CICR) apporte une aide aux victimes des conflits armés dans le monde entier, par le biais de sa Division assistance. L'une des tâches principales de cette division – assumée par son Unité eau et habitat (WatHab) – consiste à approvisionner les populations en eau potable. L'eau souterraine est souvent la ressource de choix et des réserves d'eau potable sont obtenues en réhabilitant des forages existants ou en creusant de nouveaux puits. Ces travaux sont effectués par le CICR lui-même, qui a recours à son propre personnel et à son équipement, ou par des entrepreneurs qui sont sous la supervision du personnel du CICR.

Les ingénieurs WatHab doivent être en mesure de déterminer la « réussite » et la durabilité d'un forage, réhabilité ou nouveau, comme source d'eau potable. Dans la plupart des cas, les caractéristiques sur lesquelles portent les recherches des ingénieurs sont l'efficacité et la productivité optimale. Les essais de pompage sont un moyen pratique de se faire une idée de ces caractéristiques. Les ingénieurs de WatHab ont toute une palette de qualifications techniques et une vaste expérience, et ils n'ont pas tous suivi une formation d'hydrogéologues. C'est pourquoi un guide pratique des essais de pompage est nécessaire.

## But

Ce guide est destiné aux ingénieurs WatHab travaillant sur le terrain qui réalisent ou surveillent un programme de forage ou de réhabilitation de puits et auxquels les procédures d'essai de pompage ne sont pas familières. Conçu avant tout comme un outil pratique, avec un minimum de théorie, ce guide devrait permettre à ses lecteurs de :

- comprendre l'importance et les buts des essais de pompage et connaître les différents types d'essais disponibles ;
- comprendre quels paramètres du forage ou de l'aquifère peuvent être déduits de chaque type d'essai, et quelles sont les limites et la signification de ces paramètres ;

- choisir le type d'essai à effectuer dans une situation donnée, en fonction des paramètres nécessaires et de l'équipement disponible;
- superviser l'entrepreneur auquel on aurait éventuellement confié la réalisation de l'essai;
- interpréter les résultats d'essais effectués dans un environnement hydrogéologique simple et savoir reconnaître quand certaines méthodes d'interprétation ne sont pas utilisables;
- savoir où chercher si des informations supplémentaires ou des techniques spécialisées sont nécessaires.

Ce guide a pour objet trois types de forages que les ingénieurs WatHab sont amenés à tester couramment :

1. De petits forages conçus pour être équipés d'une pompe manuelle et pour lesquels un essai simple, qui prend quelques heures et peut être effectué par n'importe quel ingénieur WatHab avec un équipement minimal, est suffisant.
2. Des forages de taille moyenne conçus pour être équipés d'une pompe motorisée (en général pour des communautés de moyenne importance ou des centres de santé ou de détention approvisionnés par de petits réseaux) et qui nécessitent un essai plus complet réalisé par un ingénieur WatHab expérimenté ayant de bonnes connaissances en hydrogéologie.
3. Des forages à grande production destinés à l'alimentation d'une ville ou à la distribution à grande échelle, et nécessitant des essais complexes réalisés généralement par un entrepreneur spécialisé sous la supervision d'un ingénieur WatHab.

Étant donné que les ingénieurs WatHab travaillent souvent dans des régions éloignées où les conditions sont difficiles, aucune des techniques décrites dans ce guide ne nécessite un ordinateur ou du matériel perfectionné. Il est très rare de disposer d'autres points de mesure que le forage lui-même, c'est pourquoi le guide se limite aux informations qui peuvent être obtenues par des pompages dans le forage.

## Limites des essais de pompage

L'hydrogéologie n'est pas une science exacte. Les niveaux de la nappe phréatique et les débits de pompage mesurés au cours des essais donnent quelques indications sur le comportement ou l'état de santé du système des eaux souterraines. Il est certain que ces essais fournissent de précieuses informations, nous aident à comprendre le système des eaux souterraines et guident nos décisions. Néanmoins, il n'y a pas de formules magiques en hydrogéologie et les décisions doivent se fonder sur une compréhension plus étendue de la géologie, de l'hydrogéologie et de l'environnement de la région. Il ne sert à rien d'introduire aveuglément les données des essais de pompage dans des équations.

## Terminologie et lectures

Un glossaire regroupant les termes hydrogéologiques courants figure à l'annexe A, à l'intention des personnes n'ayant pas de formation spécifique. Pour des informations approfondies sur les principes fondamentaux de l'écoulement des eaux souterraines, la théorie à la base de l'analyse des essais de pompage, l'exploration des eaux souterraines, la construction de forages, les questions plus générales de protection de la nappe phréatique et de gestion des ressources, ainsi que l'hydrogéologie dans son ensemble, le lecteur est renvoyé à l'annexe D, qui donne des références et des suggestions de lecture.

Une explication s'impose sur l'utilisation des termes « forage » et « puits ». En général, un « forage » est un trou cylindrique vertical d'un diamètre relativement petit qui sert à extraire de l'eau, et qui est normalement creusé au moyen d'une foreuse. Par « puits », on entend un trou vertical d'un diamètre relativement grand, creusé à la main pour avoir accès à la nappe souterraine. Le mot « forage » est parfois utilisé pour désigner à la fois un forage et un puits, ou inversement, mais son sens ressort habituellement du contexte.



Photo 1 : Réalisation d'un forage

# **2. NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES ESSAIS DE POMPAGE**

## Qu'est-ce qu'un essai de pompage ?

Le concept fondamental de l'essai de pompage est très simple : de l'eau est extraite (par pompage ou puisage) d'un puits ou d'un forage, faisant ainsi baisser le niveau d'eau. Le niveau d'eau dans le forage d'extraction et le débit de pompage sont observés pendant un certain temps, de même que divers autres paramètres, lorsque c'est possible (par ex. les niveaux d'eau dans des forages d'observation). La manière dont le niveau d'eau réagit au pompage est ensuite analysée pour en tirer des informations sur les caractéristiques de performance du forage et les propriétés hydrauliques de l'aquifère.

En réalité, la situation est beaucoup plus complexe. Il faut choisir parmi de nombreux types d'essais (intermittent ou continu, de brève ou longue durée, à débit de pompage faible ou élevé, etc.). Quels autres paramètres ou caractéristiques de l'eau faudrait-il observer, en plus de ceux qui sont évidents, c'est-à-dire le niveau d'eau et le débit de pompage dans le forage évalué ? Peut-on extrapoler avec fiabilité des conclusions sur le comportement à long terme d'un forage à partir des résultats d'un essai de pompage de brève durée ? La difficulté principale que l'on rencontre en étudiant l'eau souterraine (par rapport à des mesures de l'écoulement dans une rivière, par ex.) c'est que l'on travaille en aveugle, car il est impossible de voir l'aquifère et d'observer directement son comportement. On ne peut déduire des informations sur le forage et l'aquifère qu'en regardant comment le niveau d'eau réagit au pompage.

## Pourquoi réaliser un essai de pompage ?

Des essais de pompage peuvent être effectués pour toute une série de raisons, notamment pour :

- évaluer le rendement fiable à long terme (ou débit de production) d'un forage, et donc déterminer si le forage peut être considéré comme une « réussite », et combien de personnes il pourra approvisionner ;
- évaluer la performance hydraulique d'un forage, généralement par ses caractéristiques de rendement-rabattement. Quel doit être le rabattement pour fournir une certaine quantité d'eau ?

- déduire les propriétés hydrauliques de l'aquifère. Les essais de pompage sont la méthode classique (et peut-être la seule) pour déterminer *in situ* les propriétés hydrauliques de l'aquifère, telles que la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, ou pour révéler la présence de limites hydrauliques;
- tester le fonctionnement de l'équipement de pompage et d'observation pour être sûr que tout fonctionne sans risques et efficacement et, le cas échéant, confirmer que les entrepreneurs ont fait leur travail correctement;
- évaluer les effets qu'a cette extraction sur des extractions voisines (parfois appelés interférence);
- déterminer l'impact de l'extraction sur l'environnement. Toute extraction d'eau souterraine finit par avoir un impact; ce n'est qu'une question de lieu et de temps; reste à savoir si cet impact est acceptable;
- fournir des informations sur la qualité de l'eau. La qualité de l'eau est-elle suffisante pour l'usage envisagé? Est-elle stable à long terme? Faut-il s'attendre à des problèmes tels que le prélèvement d'eau saline ou polluée après de longues périodes de pompage?
- définir des régimes d'exploitation optimaux (surtout pour le pompage à forages multiples), choisir la station de pompage la plus adaptée à un usage à long terme, et évaluer les coûts probables de pompage et/ou de traitement;
- aider à déterminer la profondeur exacte à laquelle la pompe permanente devrait être installée dans le forage (les sujets relatifs au choix et à l'installation de la pompe sont traités dans d'autres documents).

Il est important que les ingénieurs WatHab définissent les buts poursuivis *avant* d'effectuer l'essai, car ceux-ci vont grandement influencer le choix de l'essai et les paramètres à observer. Parcourez la liste ci-dessus et sélectionnez les objectifs qui s'appliquent à chaque essai de pompage prévu.

## Principaux types d'essais de pompage

Il existe de nombreux types d'essais parmi lesquels il faut choisir. Les essais les mieux adaptés aux situations dans lesquelles travaillent les ingénieurs WatHab sont les suivants :

1. **Essai par paliers :** conçu pour déterminer le rapport à court terme entre le rendement et le rabattement du forage testé. Il consiste à effectuer des pompages dans le forage, avec une série de paliers à débit différent, le débit augmentant habituellement à chaque palier. Le dernier palier devrait se rapprocher du rendement maximal estimé pour le forage.
2. **Essai à débit constant :** effectué en pompant à un débit constant beaucoup plus longtemps que dans l'essai par paliers, il est conçu avant tout pour fournir des informations sur les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère. Il n'est possible de déduire des informations relatives au coefficient d'emmagasinement de l'aquifère que si les données proviennent de forages d'observation appropriés.
3. **Essai de remontée :** consiste à observer la remontée des niveaux d'eau après l'arrêt du pompage à la fin d'un essai à débit constant (et parfois après un essai par paliers). Il est utile pour vérifier les caractéristiques de l'aquifère déduites des autres essais, mais n'est valide que si une valve anti-retour (clapet de pied) est placée sur la colonne de refoulement, sinon l'eau est refoulée dans le forage.

Ces essais peuvent être réalisés individuellement ou combinés. En général, une suite complète d'essais commence par un essai par paliers, dont les résultats aident à déterminer le débit de pompage de l'essai à débit constant, et se termine par l'essai de remontée. Le concept de l'essai peut être adapté pour une utilisation dans des forages de tailles diverses (petite, moyenne ou grande), les différences principales étant le débit de pompage, la durée de l'essai et la complexité du système d'observation. Chaque type d'essai sera décrit plus en détail dans les chapitres suivants.

# **3. PRÉPARATIFS DE L'ESSAI DE POMPAGE**

## Introduction

Certains préparatifs sont indispensables à tout essai de pompage. Il s'agit notamment de rassembler des informations sur le forage ou le puits qui sera testé. Les fruits de ce travail de préparation peuvent influencer le choix de l'essai et permettront certainement d'obtenir des résultats d'une plus grande utilité.

## Équipement d'observation de base

Les deux paramètres qui doivent être mesurés lors de tout essai de pompage sont le niveau d'eau dans le forage et le débit d'extraction de l'eau (par pompage ou puisage). L'équipement de base nécessaire pour observer ces deux paramètres est le suivant :



Photo 2 : Sonde piézométrique manuelle

### OBSERVATION DU NIVEAU D'EAU

L'appareil manuel de contrôle du niveau d'eau appelé communément «sonde piézométrique» est le moyen le plus pratique, robuste et accessible d'observer les niveaux d'eau dans les forages et les puits. La sonde piézométrique est descendue dans le forage, et lorsqu'elle atteint la surface de l'eau, un circuit électrique est activé et émet un «bip». Le niveau d'eau peut alors être lu sur un ruban gradué, en général avec une précision d'un centimètre. Normalement, le niveau d'eau est enregistré en mètres, au-dessous d'un point de référence, par ex. le bord supérieur du tubage. Le sondage manuel par sonde piézométrique est généralement considéré comme une méthode fiable et relativement sûre pour obtenir des

données sur les niveaux d'eau, mais il n'est pas totalement dénué de problèmes, dont voici quelques exemples :

- des personnes différentes visitant le même site peuvent, par mégarde, utiliser des points de référence différents pour effectuer les relevés. Si elles ne le notent pas, la comparaison ultérieure des relevés pourrait créer une certaine confusion.
- Le ruban gradué de la sonde piézométrique peut se distendre à cause du vieillissement, de la température ou d'une mauvaise utilisation, ce qui causera une imprécision systématique, surtout si l'on utilise des sondes piézométriques différentes.
- Si le niveau d'eau baisse ou monte rapidement, par exemple au début d'un essai de pompage, il peut être difficile de faire des relevés manuels assez rapidement, même si cette difficulté s'atténue avec la pratique.
- Il peut être difficile d'obtenir un relevé précis du niveau d'eau dans le forage, surtout si de l'eau ruisselle sur les parois, ou s'il y a des turbulences à la surface de l'eau.
- La sonde piézométrique peut se coincer, s'emmêler ou s'enrouler autour de la pompe, de la colonne de refoulement, des câbles électriques ou d'autres objets se trouvant dans le forage. Pour l'éviter, on peut utiliser un tube à sonde (un tube en plastique aux extrémités ouvertes installé dans le forage pour faire descendre la sonde), qui résout également le problème du ruissellement et des turbulences.



Photo 3 : Installation d'un capteur de pression

On peut éviter l'usage d'une sonde piézométrique manuelle en installant un capteur de pression dans le forage. On le place à un endroit connu (au-dessous du niveau d'eau) où il mesure la pression. Cette information permet de déduire la hauteur d'eau au-dessus de ce point, et donc le niveau d'eau dans le forage.

Les capteurs de pression (à enregistreur de données intégré ou *datalogger*) présentent un avantage évident : ils peuvent rester sans surveillance pendant de longues périodes, tout en continuant à mesurer fréquemment le niveau d'eau. Dans la pratique, ils peuvent toutefois poser les problèmes suivants :

- ces capteurs sont coûteux, par rapport à la sonde manuelle, et ils ne supportent pas toujours les conditions rudes et les températures élevées du terrain.
- Les capteurs sont conçus pour supporter certaines fourchettes de pressions, et si l'on utilise le mauvais type de capteur, celui-ci peut être endommagé et les données faussées.
- Si le capteur ou l'enregistreur de données fonctionnent mal, ou si la batterie se vide, les données obtenues depuis le dernier téléchargement peuvent être perdues, et l'essai devra éventuellement être refait.

En dépit de ces inconvénients, les enregistreurs de données sont de plus en plus courants, et ils sont un outil utile pour vérifier les essais de pompage effectués par des entrepreneurs (lorsqu'il n'est pas possible de maintenir une supervision continue sur le terrain). Parmi d'autres méthodes de mesure des niveaux d'eau, qui sont moins utilisées, on peut citer les dispositifs suivants : flotteur/contrepois, pneumatique (insufflation de bulles), « plopper », cordeau à craie, piézomètre à corde vibrante, doppler acoustique et piézomètre à sifflet.

### **OBSERVATION DES DÉBITS DE POMPAGE**

Il existe de nombreuses façons de mesurer les débits de pompage, dont les plus communes, ou celles qui auront

certainement la plus grande utilité pour les ingénieurs WatHab, sont les suivantes :

**Seau et chronomètre :** pour mesurer des débits de pompage relativement faibles, il suffit de prendre un seau et un chronomètre. On fait en sorte que la pompe déverse l'eau dans un seau de volume connu, et on enregistre le temps nécessaire pour remplir le seau. Le débit est ensuite calculé en divisant le volume du seau par le temps nécessaire à le remplir. Pour que cette méthode soit précise, il faudrait que le temps de remplissage du seau soit au minimum de 100 secondes. Si nécessaire, il faut utiliser un conteneur d'un plus grand volume, par ex. un fût à pétrole.



Photo 4 : Seau et chronomètre

**Débitmètres :** lorsqu'un équipement plus sophistiqué est disponible, les débits peuvent être mesurés par des débitmètres, qui sont de divers types. À droite, vous voyez le débitmètre qui fait partie du kit standard du CICR pour les essais de pompage. Il utilise des pistons à ressort qui sont défléchis par le flux d'eau, et le débit est lu sur l'échelle graduée. Il est important de vérifier le débit en utilisant une autre méthode, d'utiliser correctement la jauge et de maintenir le matériel en bon état.



Photo 5 : Débitmètre

**Compteurs d'eau :** certains débitmètres enregistrent le volume d'eau cumulé qui passe par le compteur, donc il est nécessaire de faire des relevés à des heures précises et de calculer le débit, après avoir vérifié les unités que le compteur utilise. Pour être précis, les débitmètres devraient être installés conformément aux instructions du fabricant, en respectant la longueur du tuyau droit, horizontal, à mettre avant et après le compteur.



Photo 6 : Compteur d'eau

**Réservoir – déversoir :** il s'agit d'un déversoir jaugeur en tôle fine avec une encoche en V placé dans un réservoir. Les réservoirs - déversoirs doivent être posés à l'horizontale ; il faut en outre disposer d'une méthode permettant de mesurer précisément le niveau d'eau à l'intérieur du réservoir ainsi que du tableau de conversion fourni par le



Photo 7 : Réservoir - déversoir

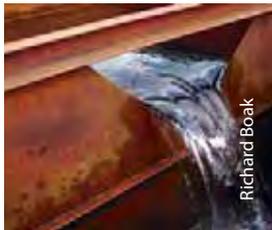


Photo 8 : Réservoir - déversoir artisanal

fabricant (pour convertir les niveaux d'eau en débits). Voir BS ISO 14686:2003 pour des informations sur la construction et l'utilisation de réservoirs - déversoirs.

**Réservoirs – déversoirs artisanaux:** une autre possibilité consiste à construire de petits réservoirs - déversoirs sur place, en utilisant les matériaux disponibles, parfois même un ancien fût à pétrole. Ces réservoirs devraient être étalonnés par une méthode de mesure du flux indépendante, afin de garantir des données fiables. Pour obtenir des résultats précis, il faut suivre soigneusement les consignes de construction (voir BS ISO 14686:2003), surtout pour l'encoche en V en tôle fine. L'exemple illustré à droite n'est pas un modèle standard, car le bord de l'encoche en V est trop large, et cela modifie l'écoulement de l'eau au passage de l'encoche.

Quelle que soit la méthode utilisée, il est important de mesurer fréquemment le débit de pompage au cours de l'essai, car il va probablement diminuer au fur et à mesure que le niveau d'eau baisse, et le débit de pompage moyen doit être calculé pour l'analyse de l'essai.

### Autre équipement disponible

Avant de choisir le type d'essai qu'ils vont effectuer, les ingénieurs WatHab devraient voir quel est l'équipement pratique et abordable dont ils peuvent disposer. En plus du matériel servant à mesurer le niveau d'eau et le débit décrit ci-dessus, l'équipement potentiel comprend les éléments suivants:

- pompe motorisée: en général, une pompe électrique immergée. Vérifiez si une source d'électricité adéquate est disponible; de nombreuses pompes immergées nécessitent un courant triphasé, donc le courant ordinaire du secteur ne convient pas toujours.
- Générateur: nécessaire si une pompe motorisée est utilisée à un endroit retiré, ou si l'alimentation électrique sur place est inadaptée ou non fiable. Assurez-vous que la quantité de carburant disponible est suffisante pour la durée prévue de l'essai.

- Colonne de refoulement : pour faire remonter l'eau de la pompe immergée à la surface du forage ; elle peut être constituée d'un tuyau souple ou de plusieurs tuyaux rigides raccordés.
- Vannes à réglage manuel : installées entre la colonne de refoulement et les conduites d'évacuation, pour réguler le débit de pompage si la pompe est utilisée à une vitesse fixe.
- Conduites d'évacuation : pour transporter l'eau assez loin du forage et éviter qu'elle ne retourne dans le circuit (c'est-à-dire pénètre à nouveau dans le forage ou s'infiltre rapidement dans le sol et influence le niveau de la nappe près du forage testé).
- Matériel pour surveiller la qualité de l'eau : voir le paragraphe ci-dessous sur la qualité de l'eau.
- Matériel pour mesurer le débit des eaux de surface : il est parfois nécessaire d'observer les cours d'eau à proximité pour voir si l'extraction d'eau de la nappe modifie leur écoulement ou cause des infiltrations depuis la rivière (ce qui peut être un risque sanitaire si l'eau de surface est de mauvaise qualité).
- Préleveurs « *Bailers* » : nécessaires pour un essai de puisage (décrit ci-dessous dans « essai de remontée »).

Quel que soit l'équipement utilisé, il doit être maintenu en bon état et employé correctement (conformément aux instructions du fabricant). Il devrait également être conçu de telle sorte que son utilisation soit sans danger, et si nécessaire, il doit être étalonné pour fournir des données fiables et précises. Une fois installé, l'équipement doit être testé avant le début d'un essai de pompage, afin de s'assurer que tout fonctionne correctement et afin de définir les réglages de la pompe ou de la vanne qui fourniront les débits voulus.

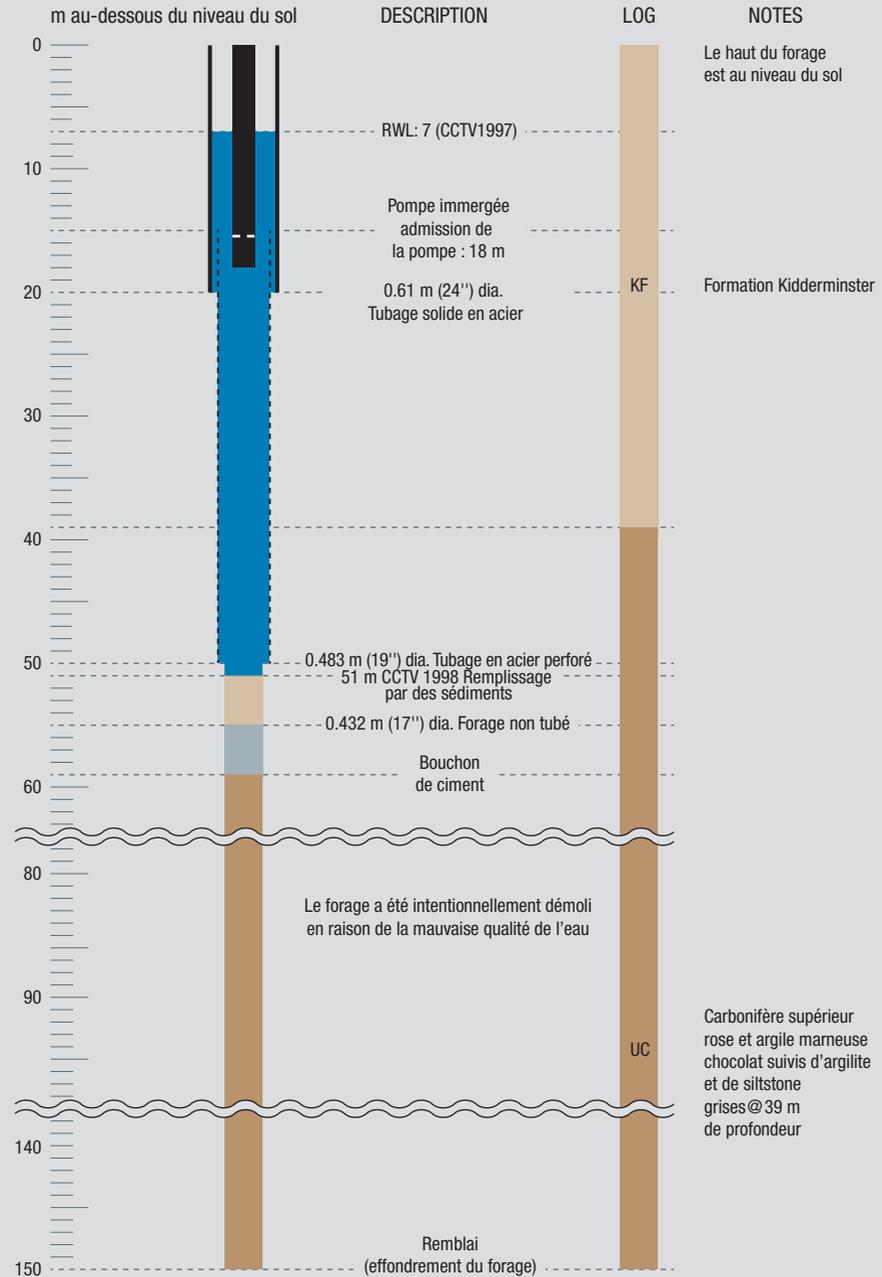
### Récolte d'informations

Lors de la planification d'un essai de pompage, il convient de collecter toutes les informations disponibles sur l'aquifère et le forage. Les résultats de l'essai de pompage seront joints à ces informations et amélioreront la connaissance

du système local d'eaux souterraines. Essayez de rassembler des informations sur les points suivants :

- forages semblables: y a-t-il d'autres forages dans la région (surtout dans la même formation géologique)? Quels sont les niveaux d'eau et les rendements habituels de ces forages, et quelle est la qualité de l'eau? Ces forages sont-ils utilisés en ce moment? Dans l'idéal, il ne devrait pas y avoir de pompages dans des forages proches pendant votre essai de pompage, en tout cas pendant les 24 heures précédant le début de votre essai (ces forages pourraient servir de forages d'observation). Quel rabattement peut-on escompter dans le forage qui va être testé? À quelle profondeur faut-il placer l'admission (entrée) de la pompe, afin qu'elle reste bien en dessous du niveau d'eau pendant l'essai?
- Données géologiques de base: la roche est-elle un socle cristallin, volcanique, constituée de sédiments consolidés ou non consolidés? Selon les roches, la nappe souterraine se forme et se comporte différemment.
- Configuration de l'aquifère: l'aquifère est-il captif, libre ou semi-captif? De nombreuses méthodes d'analyse d'essais de pompage (notamment celles qui sont décrites dans ce guide) présupposent que l'aquifère est captif. Mais ces méthodes peuvent aussi souvent être utilisées dans des aquifères non captifs, pour autant que le rabattement soit faible comparé à l'épaisseur saturée de l'aquifère. La littérature ne définit pas le terme « faible » et l'épaisseur saturée de l'aquifère n'est souvent pas connue avec précision, donc la validité de cette méthode d'analyse est malheureusement une question d'appréciation.
- Construction du forage: quelle est la profondeur du forage et quel est son diamètre? Un tubage solide, une crépine ou un massif filtrant ont-ils été installés? À noter que si l'on ne connaît pas la profondeur totale du forage, on peut utiliser une sonde piézométrique pour la mesurer, après avoir retiré la pile (afin qu'elle ne « bipe » pas continuellement); on descendra la sonde piézométrique jusqu'à ce que l'on sente le fond du forage. Faites

**Figure 3.1** Diagramme de construction du forage



en sorte que le ruban de la sonde ne s'emmêle pas avec la pompe ou la colonne de refoulement. En cas de risque de ce genre, utilisez plutôt un poids attaché à l'extrémité d'une longue ficelle ou d'une fine corde.

- Matériel installé: si une pompe est déjà installée dans le forage, quels sont son type et sa capacité, et à quelle profondeur se trouve son admission? Peut-on modifier le débit de la pompe?
- Niveaux d'eau enregistrés par le passé et informations générales: des informations sur le comportement passé du niveau de la nappe sont très utiles. Le niveau d'eau varie-t-il fortement de la saison des pluies à la saison sèche? Au cours de la période précédant l'essai, le niveau d'eau est-il en train de baisser, de monter, ou est-il stable? Quel est le niveau d'eau actuel?
- Connaissances de la population: les habitants de la région connaissent souvent étonnamment bien le comportement de la l'eau souterraine. Par exemple, comment le niveau d'eau réagit-il à des précipitations? Les rendements du forage peuvent-ils être maintenus? L'eau est-elle potable, et la qualité de l'eau varie-t-elle au cours du temps?
- Vérification de l'accès: lorsque vous planifiez un essai de pompage dans un forage existant, vérifiez s'il y a un accès pour la sonde piézométrique ou une pompe temporaire dans les aménagements de surface. Si vous n'avez pas vu le forage avant, vous pouvez arriver sur le site avec tout votre équipement pour effectuer l'essai et découvrir qu'il y a une tête de forage solide qui ne permet pas d'accéder à l'intérieur du forage.

Il est possible que les informations disponibles soient rares, auquel cas vous ferez connaissance avec le système des eaux souterraines en planifiant votre essai. Il est très utile de prendre la peine de noter toutes les données récoltées, afin que ce travail ne doive pas être refait à l'avenir. Vous trouverez un formulaire pour consigner les informations de base sur le forage à l'annexe E.

### **DÉVELOPPEMENT PNEUMATIQUE** (*AIR LIFT*)

Si l'essai de pompage est effectué dans un nouveau forage peu après que celui-ci a été creusé, le développement pneumatique peut être une source d'informations utiles. Le développement pneumatique consiste à pomper de l'air comprimé dans un forage par une conduite d'air sous haute pression, qui se trouve parfois dans un tuyau de décharge, qui joue le rôle de colonne de refoulement. L'air comprimé est injecté bien en dessous du niveau de l'eau, et si c'est fait correctement, il fait sortir l'eau du forage et sert de moyen de pompage grossier. Le développement pneumatique est une opération de routine régulièrement effectuée lors d'un nouveau forage, et il sert essentiellement à nettoyer et à « développer » le forage. En deux mots, développer un forage consiste à pomper avec force pour éliminer tous les déblais de forage, la boue et les sédiments en suspension, afin de clarifier l'eau. Le développement pneumatique se fait normalement lorsque la foreuse est encore en place au-dessus du forage, mais il peut aussi se faire de manière indépendante en utilisant un compresseur d'air portable. Même s'il ne remplace pas l'essai de pompage, le développement pneumatique peut fournir des informations utiles sur le rendement d'un forage, et peut aider à choisir le débit qui devrait être utilisé pour l'essai de pompage. Demandez aux foreurs de mesurer le débit lors du développement pneumatique. Le processus de foration peut aussi fournir des informations hydrogéologiques utiles, telles que :

- découvertes d'eau : la profondeur à laquelle de l'eau a été trouvée pour la première fois, et les profondeurs de foration auxquelles des entrées d'eau significatives ont été constatées, peuvent indiquer la profondeur et le rendement de fissures et fractures individuelles et aider à déterminer le positionnement du tubage et de la crépine.
- Vitesse de foration : la progression quotidienne du forage peut renseigner sur la dureté des couches de roche traversées, donnant une idée des différences entre les couches et des chances relatives de trouver de l'eau.

- Charge à différentes profondeurs: le niveau d'eau statique mesuré dans le forage au cours de la foration peut donner des indications sur la présence de gradients hydrauliques verticaux.

## Hygiène et eau

Les liens existant entre la qualité de l'eau et la santé publique sont bien connus, et l'on a beaucoup écrit sur l'importance des mesures sanitaires et des pratiques d'hygiène, la protection de la nappe phréatique et l'amélioration des sources d'eau traditionnelles. Il est essentiel de ne pas oublier les principes d'une bonne hygiène de l'eau au cours des essais de pompage. Il faut notamment veiller à :

- faire en sorte que de l'eau contaminée ne puisse pas entrer dans le forage pendant l'essai de pompage, surtout si l'on utilise un matériel de pompage temporaire dans un forage ouvert, et s'il y a un déversement accidentel d'eau ou un écoulement dû à des précipitations au cours de l'essai.
- Fournir des installations sanitaires suffisantes au personnel de terrain et à l'équipe effectuant l'essai de pompage, et insister pour qu'ils adoptent de bonnes pratiques d'hygiène, notamment en se lavant les mains. Si l'une de ces personnes présente des symptômes tels qu'une diarrhée persistante ou une fièvre prolongée inexplicquée, recommandez-lui de ne pas participer à l'essai.
- Faire en sorte que tout l'équipement qui entrera en contact avec la nappe souterraine ou la tête de puits (pompes, tubes, vannes, sondes piézométriques, échantillonneurs, tubes à clapet, cordes, outils, etc.) ait été nettoyé correctement avant d'être utilisé, surtout s'il a été précédemment en contact avec de l'eau contaminée. N'oubliez pas d'éliminer l'eau contaminée en rinçant les chambres d'aspiration, les vannes et les colonnes de refoulement.
- Si vous utilisez un équipement mécanique tel que générateurs mobiles, compresseurs d'air et foreuses, s'assurer qu'il est en bon état et qu'il n'y a pas de fuites

d'huile hydraulique lubrifiante, de diesel ou d'autres carburants. Il serait souhaitable de disposer de bacs collecteurs et de matelas absorbants en cas de fuites ou de déversements accidentels.

- Prendre des dispositions pour l'entreposage temporaire de fûts ou autres conteneurs de carburant, d'huile ou d'autres substances dangereuses, et imposer une méthode sûre de ravitaillement en carburant afin qu'il n'y ait aucun risque de contaminer la réserve d'eau au cours de l'essai de pompage.
- S'assurer que le forage a été sécurisé lorsque vous le quittez, afin que des objets étrangers, des animaux ou de l'eau sale ne puissent pas y pénétrer.

Lorsque vous préparez des instructions ou un cahier des charges pour les entrepreneurs chargés de l'essai de pompage, incluez ces points dans les exigences ou les conditions requises (pour plus d'informations sur ce sujet, voir chapitre 7).



Richard Boak

Photo 9 : Turbidimètre manuel

## Surveillance de la qualité de l'eau

Même si la plupart des essais de pompage visent principalement à observer les niveaux d'eau et les débits de pompage, la surveillance de la qualité de l'eau peut aussi être un élément important de l'essai et devrait être prise en compte lors de la planification. Comme mentionné ci-dessus, la qualité de l'eau et la santé publique sont étroitement liées, et même si un forage peut garantir un rendement élevé, il

peut arriver que l'eau produite soit impropre à la consommation. N'oubliez pas que les problèmes liés à la qualité de l'eau ne sont pas toujours immédiatement visibles – à preuve la controverse au sujet des fortes teneurs en arsenic de la nappe phréatique du Bangladesh. Dans les eaux souterraines de certaines régions d'Afrique, le fluorure est un problème fréquent. Un long exposé sur la qualité de l'eau n'a pas sa place dans ce guide, mais pour la planification des essais de pompage, il est important de savoir si la surveillance de la qualité de l'eau est incluse dans le programme. Les observations recueillies lors de l'essai peuvent aider à répondre à des questions essentielles :

- la qualité de l'eau est-elle suffisante pour l'usage prévu (en particulier, l'eau est-elle potable) ?
- La qualité de l'eau est-elle stable à long terme ?
- La qualité de l'eau varie-t-elle en fonction du débit pompé ?
- Y a-t-il un débit de pompage au-dessus duquel la qualité de l'eau se détériore subitement ?
- Est-il nécessaire de traiter l'eau avant de l'utiliser ?
- La nappe souterraine est-elle vulnérable à la pollution, ou à la pénétration d'eau de surface contaminée ?

Lorsque vous planifiez un essai de pompage, tenez compte des questions pratiques suivantes :

- certains paramètres, tels que la conductivité électrique, la température, le pH et la turbidité doivent être mesurés à la tête de puits, ou juste après que l'eau est sortie du sol. En général, les relevés se font avec des sondes manuelles.
- Pour mesurer certains paramètres, il faut parfois prélever des échantillons dans des bouteilles pour les analyser ensuite au moyen d'un kit d'analyse de terrain ou dans un laboratoire. Prévoyez un endroit adéquat pour prélever des échantillons dans le système de refoulement afin de pouvoir obtenir des échantillons propres, sans éclaboussements depuis le sol, par exemple.
- Si vous ne disposez pas d'un kit d'analyse de terrain, les échantillons qui serviront à l'analyse microbiologique

doivent être conservés au frais et doivent parvenir au laboratoire dans un certain délai. Est-ce possible ?

- La conductivité électrique peut être corrélée à des solides totalement dissous et constitue un indicateur utile de la qualité de l'eau (surtout de la salinité). Observez les changements de conductivité au cours de l'essai, surtout lors d'un essai par paliers lorsque le débit augmente progressivement.
- Ne négligez pas les indices simples, tels que l'apparence, l'odeur et la couleur de l'eau. Notez-les au cours de l'essai. Changent-ils ?
- Certains forages produisent du sable, qui peut endommager le matériel de pompage et remplir les réservoirs. Si vous soupçonnez cette difficulté, prenez un échantillon de l'eau refoulée avec un récipient propre. Mettez-le de côté, attendez que le sable se dépose, puis mesurez l'épaisseur de sable. Prenez d'autres échantillons à intervalles réguliers en utilisant le même récipient et enregistrez les changements dans la quantité de sable.
- Lors de chaque prélèvement effectué pour analyser la qualité de l'eau, enregistrez des informations de base telles que l'heure et la date de la prise d'échantillon, ainsi que le nom et l'emplacement du forage.



**Photo 10: Preuve de la présence de sable**



Laurent Wismer/CICR

# **4. ESSAI PAR PALIERS**

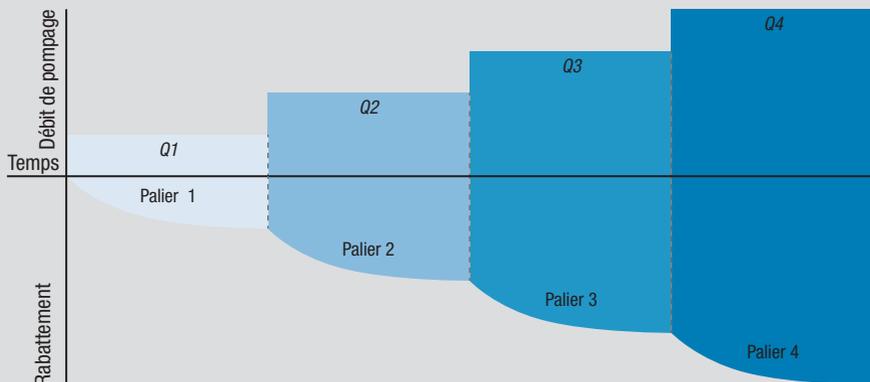
## Introduction

L'essai par paliers (parfois appelé essai par paliers de rabattement) est conçu pour déterminer le rapport à court terme entre le rendement et le rabattement dans le forage testé. Il consiste à effectuer une série de pompages à différents débits, pendant des temps relativement courts (normalement, toute la série peut être terminée en un jour). Un essai par paliers peut être réalisé de différentes façons, mais la plus courante est la suivante :

- commencer par un débit de pompage faible, et l'augmenter à chaque palier, sans débrancher la pompe entre les paliers.
- Prévoir quatre à cinq paliers au total, les débits de pompage progressant par échelons plus ou moins réguliers entre le minimum et le maximum.
- Tous les paliers devraient avoir la même durée, la plus courante étant de 60 à 120 minutes.
- Le débit du dernier palier devrait être égal ou supérieur au débit d'exploitation prévu lorsque le forage fonctionnera à pleine capacité. Cela n'est possible, bien sûr, que si la pompe utilisée pour l'essai peut fournir un tel débit.

La fig. 4.1 illustre une séquence typique de débits de pompage ( $Q$ ) et le comportement du niveau d'eau. On voit immédiatement pourquoi cet essai est dit « par paliers ».

**Figure 4.1** Schéma de l'essai par paliers



## Équipement et limites

Pour effectuer un essai par paliers, l'équipement suivant est nécessaire :

- une pompe motorisée complète, comprenant alimentation, colonne de refoulement, vannes et conduites de refoulement, montés de telle sorte que le débit puisse être modifié pour atteindre les débits voulus pour les différents paliers. La plupart des pompes travaillent à une vitesse fixe, donc généralement, on y parvient en «étranglant» la pompe au moyen d'une vanne, puis en ouvrant progressivement cette dernière pour atteindre des débits de plus en plus grands.
- Un chronomètre pour mesurer le temps de pompage et de remontée.
- Une sonde piézométrique pour mesurer les niveaux d'eau.
- Un dispositif pour mesurer le débit de pompage (seau et chronomètre, débitmètre, etc.).
- Un carnet, ou un formulaire standard, et un crayon pour consigner les données de l'essai.
- Du papier millimétré linéaire et une règle pour reporter les résultats.

Comme indiqué ci-dessus, les essais par paliers sont conçus essentiellement pour fournir des informations sur les caractéristiques de performance des forages (rapport rendement – rabattement). Il est possible d'utiliser les résultats d'un essai par paliers pour évaluer la transmissivité d'un aquifère, et les méthodes à employer se trouvent dans les principaux manuels d'hydrogéologie (exemples à l'annexe D). Le présent guide se concentre sur les performances du forage. Les résultats d'un essai par paliers ne sont pas vraiment appropriés pour prédire le comportement d'un forage lors de pompages à long terme ; pour cela, il vaut mieux effectuer un essai à débit constant.



Richard Boak

**Photo 11 : Robinet à opercule sur la conduite de refoulement**

*Régler les débits de pompage:* le jour précédant l'essai de pompage, il est recommandé d'essayer le réglage des vannes, pour obtenir les débits voulus pour chaque palier. On utilise en général des robinets vanne ou à soupape réglés manuellement au moyen d'une manette à vis. Fermez totalement la vanne, puis ouvrez-la complètement et comptez le nombre de rotations de la manette entre ces deux positions. Expérimentez le réglage en faisant un nombre différent de rotations depuis la position fermée, afin d'obtenir les différents débits prévus pour les paliers, et notez les résultats.

*Choisir la durée du palier:* dans la pratique, la durée de chaque palier dépend du nombre de paliers et du temps total disponible pour l'essai (en général une journée), mais 60, 100 ou 120 minutes sont des durées de paliers courantes. Idéalement, le niveau d'eau dans le forage devrait se rapprocher de l'équilibre à la fin de chaque palier, mais ce n'est pas toujours réalisable. Même si le niveau d'eau n'atteint pas l'équilibre à la fin de chaque palier (en d'autres termes s'il continue à baisser lentement), les résultats de l'essai seront tout de même utiles. Ils donnent un « instantané » des performances du forage dans certaines conditions, et peuvent être comparés aux résultats du même essai (débits et durée des paliers identiques) répété à un autre moment, pour voir si les performances du forage ont changé. Si le niveau d'eau continue à baisser rapidement à la fin du premier palier, on peut décider de prolonger la durée du palier (et d'ajuster les paliers suivants en augmentant aussi leur durée). Vous trouverez plus de détails théoriques et pratiques sur les essais par paliers chez Clark (1977).

## Déroulement de l'essai par paliers

Une fois que l'équipement est prêt et que les différentes tâches ont été attribuées, l'essai se déroule de la façon suivante :

1. Choisissez un point de référence (par ex. le bord supérieur du tubage) à partir duquel tous les relevés du niveau d'eau seront effectués, et mesurez le niveau d'eau résiduel. Le niveau doit être stable avant le début de l'essai, donc celui-ci ne doit pas être réalisé un jour où le forage vient d'être fait ou développé, ou lorsque l'équipement est testé.
2. Ouvrez la vanne au réglage prévu pour le premier palier (fixé lors de l'essai précédemment décrit) et enclenchez simultanément la pompe et le chronomètre. Ne modifiez pas constamment le réglage de la vanne pour obtenir un débit particulier (par ex. un chiffre rond pour le nombre de litres par minute). Visez plutôt un débit approximatif et mesurez le débit réel (voir point 4 ci-dessous).
3. Mesurez le niveau d'eau dans le forage toutes les 30 secondes pendant les 10 premières minutes, puis toutes les minutes pendant 30 minutes, et enfin toutes les 5 minutes jusqu'à la fin du palier (la durée de chaque palier ayant été fixée lors des préparatifs de l'essai). Si vous oubliez de mesurer le niveau d'eau au moment prévu, notez précisément l'heure à laquelle le relevé est effectué. Consignez tous les relevés sur le formulaire standard prévu pour les essais par paliers (annexe E).
4. Mesurez le débit de pompage juste après le début du palier, puis à intervalles réguliers (toutes les 15 minutes paraît raisonnable). S'il y a une accélération nette du rabattement, ou si la pompe fait un bruit différent, mesurez le débit à ces moments-là également. Si le débit de pompage change de manière significative (disons plus de 10%), ajustez la vanne pour maintenir un débit aussi stable que possible durant tout le palier. Veuillez à ne pas trop corriger, ce qui aggraverait encore le problème.

5. À la fin du 1<sup>er</sup> palier, ouvrez la vanne jusqu'au réglage prévu pour le 2<sup>e</sup> palier, notez l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et répétez les mesures du niveau d'eau et du débit de pompage (voir points 3 et 4 ci-dessus).
6. Répétez la procédure pour les paliers suivants, en augmentant progressivement le débit de pompage à chaque palier.
7. À la fin du dernier palier (qui sera probablement le 4<sup>e</sup> ou le 5<sup>e</sup>) débranchez la pompe, notez l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et mesurez la remontée du niveau d'eau aux mêmes intervalles que ceux auxquels vous avez mesuré le rabattement lors de chaque palier. Continuez pendant la durée d'au moins un palier, idéalement beaucoup plus longtemps, jusqu'à ce que le niveau d'eau se rapproche du niveau enregistré avant l'essai. Pour une explication détaillée de la période de remontée, voir le chapitre 6.

## Analyse et interprétation

Les résultats d'un essai par paliers peuvent être analysés de différentes façons, dont certaines sont très complexes, mais le présent guide décrit des méthodes simples qui se concentrent sur les performances du forage. Pour les détails de méthodes d'analyses plus élaborées, le lecteur peut consulter les manuels standard (voir annexe D).

### L'ÉQUATION DE JACOB

La théorie de l'hydraulique des eaux souterraines pré-suppose que pendant le pompage dans un forage, les conditions de flux dans l'aquifère sont laminaires. Si c'est effectivement le cas, le rabattement dans le forage est directement proportionnel au débit de pompage. Toutefois, des turbulences peuvent se produire dans l'aquifère à proximité du forage si le pompage se fait à un débit suffisamment élevé ; en outre, dans le dernier trajet, lorsque l'eau passe de l'aquifère au forage et à la pompe à travers le massif filtrant et la crépine, l'écoulement devient presque toujours turbulent. Ceci entraîne des « pertes de charge » dans le puits, ce qui signifie qu'un rabattement

supplémentaire est nécessaire pour que l'eau entre dans la pompe. Si l'eau est agitée par des turbulences, Jacob propose d'exprimer le rabattement dans le forage par l'équation suivante (expliquée en détail dans Kruseman et de Ridder [1990]):

$$s = BQ + CQ^2 \quad \text{Équation 4.1}$$

où  $s$  est le rabattement,  $Q$  le débit de pompage et  $B$  et  $C$  des constantes. Si tous les termes de l'équation 4.1 sont divisés par  $Q$ , on obtient :

$$s/Q = B + CQ \quad \text{Équation 4.2}$$

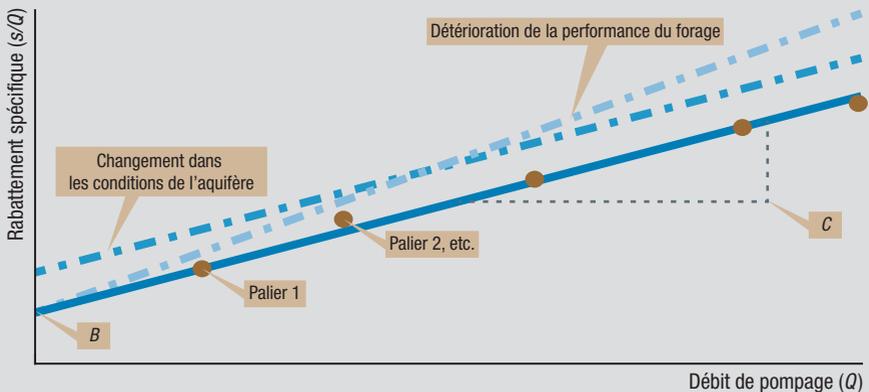
qui est l'équation d'une ligne droite (si  $s/Q$  est reporté en fonction de  $Q$  sur du papier millimétré linéaire). Notez que  $s/Q$  désigne le rabattement spécifique, et l'inverse ( $Q/s$ ) la capacité spécifique. Donc, pour analyser les résultats des essais par paliers, procédez de la manière suivante :

1. Calculez le débit de pompage moyen pour chaque palier de l'essai (prenez toutes les mesures du débit enregistrées pendant le 1<sup>er</sup> palier et calculez la moyenne; répétez le processus pour les autres paliers). Si l'essai comporte cinq paliers, vous devez obtenir cinq valeurs pour le débit de pompage ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  et  $Q_5$ ).
2. Prenez les relevés du niveau d'eau enregistrés à la fin de chaque palier (en mètres au-dessous du point de référence) et convertissez-les en rabattement en soustrayant le niveau d'eau résiduel. À nouveau, pour un essai à cinq paliers, vous devriez obtenir cinq valeurs de rabattement ( $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s_4$  et  $s_5$ ).
3. Calculez le rabattement spécifique au moyen des couples ( $s_1/Q_1$ ,  $s_2/Q_2$ , etc.). Puis dessinez un graphique de  $s/Q$  en fonction de  $Q$  sur du papier millimétré linéaire (en traçant  $s_1/Q_1$  en fonction de  $Q_1$ ,  $s_2/Q_2$  en fonction de  $Q_2$ , etc., comme le montre la figure 4.2 ci-dessous. Tracez la droite la mieux ajustée passant par les points (la ligne bleue continue sur la figure 4.2) : le

point où la droite coupe l'axe  $y$  représente la constante  $B$  et la pente de la droite représente la constante  $C$ .

Les valeurs de  $B$  et  $C$  peuvent ensuite être utilisées dans l'équation 4.1 ci-dessus pour calculer le rabattement escompté pour les autres débits ou, en adaptant légèrement l'équation, le débit attendu pour un rabattement donné. Si l'essai par paliers est répété à une date ultérieure et que la droite la mieux ajustée (sur la figure 4.2) s'est déplacée verticalement ( $B$  différent) mais que la pente est la même ( $C$ ), cela indique un changement de l'état de l'aquifère. Si  $B$  est resté identique mais que  $C$  a augmenté, la performance du forage s'est détériorée, probablement en raison d'un facteur tel que l'obstruction de la crépine. L'équation de Jacob est souvent utilisée pour calculer l'efficacité du forage, mais cette notion suscite une grande confusion, et la réalité est beaucoup plus complexe (voir encadré 4.1). Il est préférable d'utiliser l'analyse des résultats de l'essai par paliers pour essayer de comprendre les caractéristiques de la performance du forage, comme décrit ci-dessous.

**Figure 4.2** Analyse de l'essai par paliers



### COURBES DE PERFORMANCE DU FORAGE

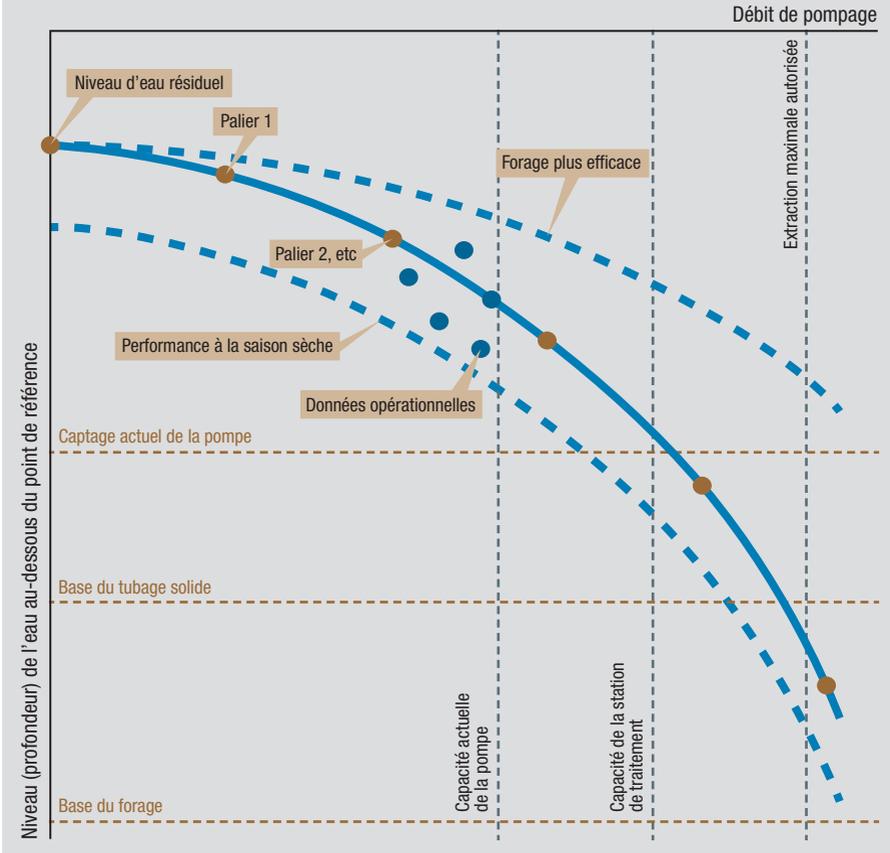
La meilleure façon de représenter la performance du forage est de tracer des courbes sur un graphique en reportant le niveau d'eau en fonction du débit de pompage. On utilise les niveaux d'eau (en mètres au-dessous du point de référence) au lieu des rabattements afin de pouvoir tracer les variations saisonnières sur le même graphique si un nouvel essai est effectué à une autre période de l'année. Ce genre de graphique est un outil très utile pour gérer les forages: en plus des données des essais de pompage, on peut y reporter des données d'exploitation et diverses contraintes. La procédure est la suivante:

1. Préparez un graphique avec les débits de pompage sur l'axe  $x$  et les niveaux d'eau sur l'axe  $y$  inversé, comme indiqué à la figure 4.3. Reportez le niveau d'eau résiduel (mesuré juste avant le début de l'essai de pompage) en fonction d'un débit de pompage de zéro.
2. Prenez les niveaux d'eau relevés à la fin de chaque palier (en mètres au-dessous du point de référence) et reportez-les en fonction du débit de pompage moyen de chaque palier ( $Q_1$ ,  $Q_2$ , etc.). Tracez une courbe régulière par ces points (niveau d'eau résiduel inclus). Vous obtenez la courbe de performance spécifique à ce forage; elle peut être utilisée pour prédire le rabattement à d'autres débits de pompage, et inversement.
3. Si vous voulez utiliser le graphique comme outil de gestion, gardez-le comme référence et mettez-le à jour en y portant les données d'exploitation (points isolés sur le graphique) chaque fois que vous visitez le forage. Vous obtiendrez une image du comportement typique du forage à différents moments de l'année (les points doivent être assortis d'une date). Si possible, introduisez diverses contraintes dans le graphique, sous forme de droites verticales ou horizontales. Les lignes verticales représentent les facteurs qui limitent le débit de pompage, tels que: capacité maximale de la pompe installée, débit de pompage

### Encadré 4.1 Efficacité du forage

On peut considérer que le rabattement dans un forage ou un puits pompé comprend deux composantes : la perte de charge due à l'aquifère (perte de charge lorsque l'eau s'écoule dans l'aquifère vers le puits) et la perte dans le puits (perte de charge lorsque l'eau coule dans le puits lui-même, souvent à travers le massif filtrant et la crépine). Dans l'équation de Jacob pour l'essai par paliers ( $s = BQ + CQ^2$ ), on considère parfois que les variables  $BQ$  et  $CQ^2$  représentent respectivement la perte due à l'aquifère (on suppose un flux laminaire) et la perte dans le puits (flux turbulent). En outre, les mêmes variables sont parfois utilisées pour calculer l'efficacité du puits avec l'équation suivante : efficacité =  $BQ/(BQ + CQ^2)$ . Mais cette équation ne montre que la proportion des pertes totales qui peut être imputée au flux laminaire, ce qui ne correspond pas à l'efficacité du puits. L'analyse des données d'essais de pompage réalisés dans des puits réels a révélé que la situation n'est pas si simple, parce que la variable  $BQ$  inclut souvent les pertes dans le puits, et parfois la variable  $CQ^2$  inclut les pertes dues à l'aquifère. Dans la pratique, il est très difficile de mesurer directement la proportion du rabattement imputable aux pertes dans le puits. Driscoll (1986) propose une méthode graphique qui consiste à extrapoler des droites sur des graphiques représentant le rabattement en fonction de la distance, mais pour cela il faut plusieurs puits d'observation situés à différentes distances du puits de pompage, un luxe très improbable dans les pays où travaille le CICR. Les essais par paliers devraient plutôt servir à déterminer le rapport rendement/rabattement. En fait, il est probable que l'efficacité du forage ne soit un enjeu que pour les grands forages à débits de pompage élevés. Dans ces cas-là, l'effort doit porter sur la conception et la construction du puits, car les facteurs principaux responsables d'un rabattement excessif sont, selon Driscoll (1986) : des crépines avec une zone d'ouverture insuffisante, une mauvaise répartition des ouvertures des crépines, une longueur insuffisante des crépines, des massifs filtrants mal conçus, un développement du puits insuffisant et un mauvais positionnement des crépines.

**Figure 4.3** Diagramme de performance du forage



maximal autorisé (si l'extraction est soumise à un système de licences dans la région), capacité d'une station de traitement de l'eau, ou capacité d'une pompe de surpression (« booster pump ») en aval. Les lignes horizontales représentent des facteurs qui limitent la hauteur de l'eau dans le forage, tels que : profondeur de l'admission de la pompe installée, base du tubage solide ou profondeur totale du forage.

Ce graphique aide l'exploitant du forage à visualiser d'un coup d'œil les facteurs qui peuvent influencer les décisions de gestion, par ex. : le forage fournirait-il plus d'eau

si l'admission de la pompe était placée plus bas, ou si une plus grande pompe était installée. La forme de la courbe peut aussi révéler de nombreuses informations. Un forage « efficace » aura une courbe plus plate (voir figure 4.3), parce qu'il peut assurer un débit de pompage donné avec un rabattement moindre que ne le ferait un forage moins performant. La pente de certaines courbes s'infléchit très fortement au-dessus d'un certain débit de pompage (comportement parfois désigné par le terme de « point d'inflexion »), indiquant que le forage se rapproche de ses limites et qu'il serait sage de maintenir le débit au-dessous de ce point critique. La courbe est donc un outil pratique pour déterminer la productivité optimale du forage.

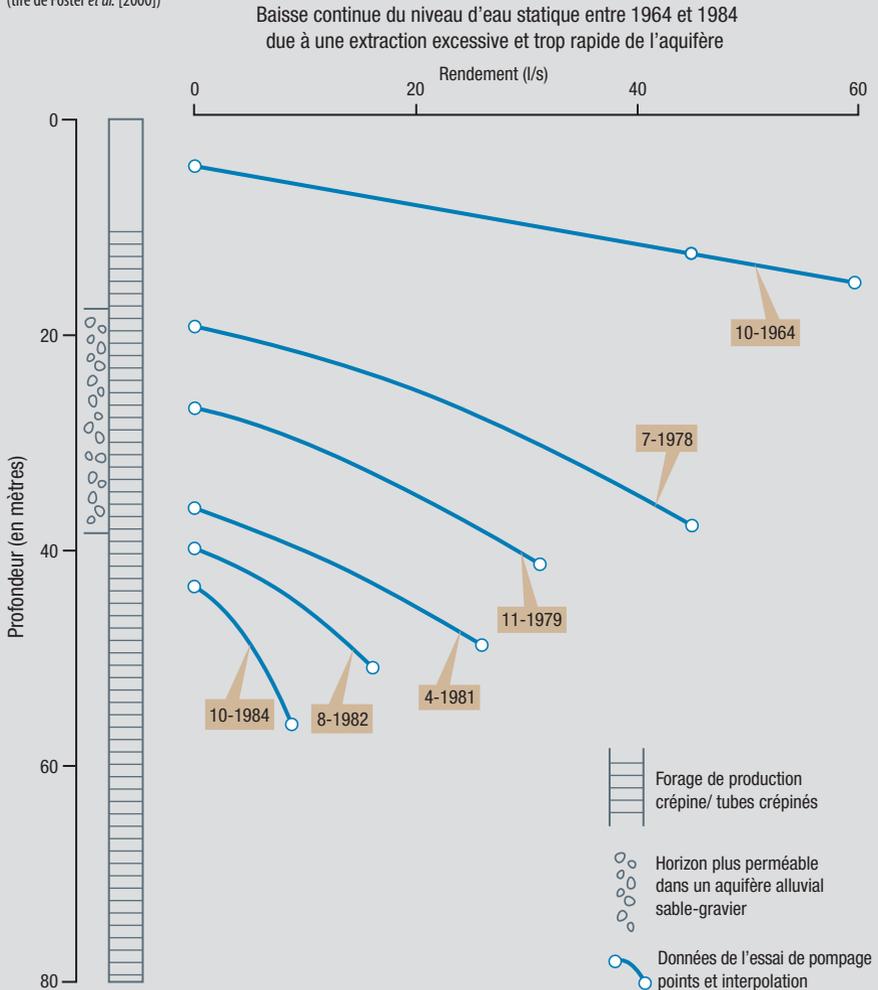
Si l'essai de pompage est répété à un autre moment de l'année ou quelques années plus tard, des changements dans l'emplacement ou la forme de la courbe peuvent aider à diagnostiquer des problèmes, tels que le colmatage de la crépine (qui redresserait la courbe, puisque le rabattement devrait être plus important pour maintenir un certain débit de pompage) ou des modifications du comportement de l'aquifère (qui déplaceraient la courbe verticalement). La figure 4.4 montre les résultats d'un essai par paliers sur plusieurs années qui révèlent une détérioration progressive de la productivité d'un forage dans un aquifère alluvial fortement exploité. Le rendement maximal est passé de 60 à 10 litres par seconde entre 1964 et 1984, alors que la hauteur manométrique a augmenté de 15 à 55 mètres. La détérioration était principalement due au dénoyage de l'horizon aquifère le plus productif (Foster *et al.*[2000]).

Il est important de se rappeler que les essais de pompage se font sur des durées relativement courtes et qu'il faut considérer les résultats avec prudence, surtout si le niveau d'eau n'a pas atteint l'équilibre (baisse encore) à la fin de chaque palier. Les données provenant d'essais répétés sont beaucoup plus utiles pour une comparaison si les essais sont effectués exactement de la même façon, avec

des paliers de même durée et des débits de pompage semblables. Pour avoir une bonne idée de la performance à long terme d'un forage, rien ne peut remplacer un essai à débit constant, qui est le sujet du chapitre suivant.

**Figure 4.4** Détérioration du forage

(tiré de Foster *et al.* [2000])





# **5. ESSAI À DÉBIT CONSTANT**

## Introduction

L'essai à débit constant est l'essai de pompage le plus couramment pratiqué, et son concept est très simple : on effectue des pompages à débit constant sur une longue durée (de plusieurs heures à plusieurs jours, voire plusieurs semaines) en observant les niveaux d'eau et les débits de pompage. Pour que ces essais à débit constant aient une utilité maximale, il faudrait mesurer les niveaux d'eau à la fois dans un forage d'observation et dans le forage de pompage (ou mieux encore, dans plusieurs forages d'observation situés à des distances différentes du forage de pompage). Comme c'est rarement possible dans les régions où travaille le CICR, le présent guide se concentre sur l'exploitation des données obtenues uniquement dans le puits de pompage. L'analyse des données des essais à débit constant permet de déduire la transmissivité de l'aquifère. Le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ne peut être calculé que si l'on dispose de données provenant de forages d'observation, ce qui n'est pas envisagé ici.

## Équipement et limites

Pour effectuer un essai à débit constant, l'équipement suivant est nécessaire :

- une pompe motorisée complète avec alimentation, colonne de refoulement, vannes et conduites d'évacuation. Il faut accorder une grande attention au système d'évacuation lors des essais à débit constant, surtout si l'essai doit durer plusieurs jours. Assurez-vous que l'eau ne va pas revenir dans le forage ou causer des ennuis en s'accumulant ou en s'écoulant à un endroit inapproprié. La meilleure solution consiste habituellement à évacuer dans un canal à écoulement naturel à une certaine distance du forage.
- Un chronomètre pour mesurer le temps de pompage et de remontée.
- Une sonde piézométrique pour mesurer les niveaux d'eau. Un capteur avec enregistrement de données serait très utile, si c'est possible, car il continue à

collecter des données lorsque les collaborateurs chargés des sondages manuels se reposent.

- Une méthode pour mesurer le débit de pompage (seau et chronomètre, débitmètre, ou déversoir).
- Un carnet, ou un formulaire standard, et un crayon pour consigner les données des essais.
- Du papier millimétré semi-logarithmique et une règle pour reporter les résultats.



Photo 12 : Évacuation dans les eaux de surface

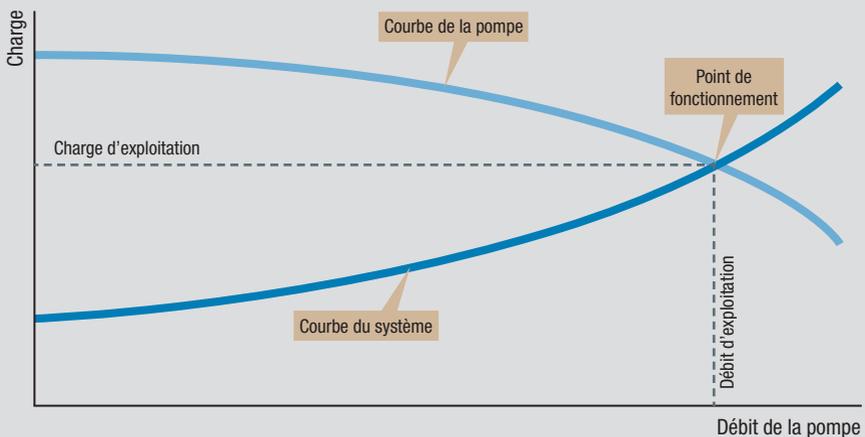
Lors d'un essai à débit constant, les deux décisions principales à prendre concernent le débit de pompage et la durée de l'essai :

- Débit de pompage : en règle générale, le débit de pompage choisi est égal au débit visé lorsque le forage fonctionnera à pleine capacité, bien que certains hydrogéologues préfèrent pour l'essai un débit de 25-50 % supérieur au débit de pompage prévu pour l'exploitation. Les informations fournies par un essai de pompage sont très utiles pour décider de ce débit, qui dépendra également de la façon dont le forage est exploité. Dans certains forages, le pompage se fait à un débit élevé pour remplir un bac de stockage ou un réservoir en relativement peu de temps, puis l'eau est prélevée

graduellement (par gravité) dans le réservoir. Le débit de l'essai de pompage peut être soit le débit effectif de la pompe lorsqu'elle est enclenchée, soit le débit moyen

### Encadré 5.1 : Performance de la pompe

Le débit d'une pompe centrifuge dépend de plusieurs facteurs, dont la puissance et l'efficacité. Néanmoins, le facteur le plus important est la charge hydraulique contre laquelle la pompe travaille. La charge totale comprend la charge statique et les pertes par frottement dans le système de pompage et de refoulement. Lors d'un essai dans un forage, au fur et à mesure que le niveau d'eau baisse, la charge totale contre laquelle la pompe travaille va augmenter, et le débit va diminuer. Ce rapport est illustré par une courbe de performance de la pompe, qui peut être établie pour chaque type de pompe (et peut en général être fournie par le fabricant). Un essai de pompage est important pour la pratique, car il peut être difficile de maintenir un débit constant si la charge totale varie considérablement, ce qui est inévitablement le cas lors de la plupart des essais, surtout au début du pompage. La solution consiste à bien choisir la pompe, afin que celle-ci ne travaille pas aux limites de sa performance. Pour des conditions d'exploitation données, une pompe va tendre vers un certain point de fonctionnement (voir le diagramme ci-dessous), où la courbe de performance de la pompe coupe la courbe du système (représentant les caractéristiques hydrauliques combinées du système de captage et de refoulement, y compris les tuyaux et les vannes).



à long terme (incluant les périodes d'exploitation sans pompage). Si l'essai porte en priorité sur la durabilité à long terme, il serait préférable d'utiliser le débit moyen de pompage.

→ **Durée de l'essai :** idéalement, un essai à débit constant devrait être assez long pour que le niveau d'eau atteigne l'équilibre, ou du moins s'en rapproche. Le temps nécessaire dépend des propriétés hydrauliques de l'aquifère. À nouveau, les résultats de l'essai par paliers aideront à voir comment l'aquifère réagit aux pompages. Pour un forage de petite taille ou de taille moyenne, un ou deux jours devraient être suffisants, mais pour un grand forage qui doit approvisionner une population importante, une durée d'une ou deux semaines est plus courante.

De nombreux aquifères réagissent différemment selon la période de l'année (saison des pluies ou saison sèche). Dans toute la mesure du possible, il faudrait donc effectuer l'essai à débit constant au cours de la saison appropriée. Par exemple, si le forage doit fournir de l'eau en cas de graves sécheresses, il faut le tester pendant la saison sèche, sinon l'idée que l'on aura de la performance de l'aquifère sera erronée. Une autre raison de réaliser l'essai pendant une période sèche, c'est que le niveau de la nappe peut être influencé par la recharge due à de fortes précipitations, ce qui rend plus difficile l'interprétation des résultats de l'essai.

Il est parfois problématique de maintenir un débit stable lors d'un essai à débit constant, surtout si le débit choisi provoque un rabattement important. Cela provient du fait qu'avec une pompe centrifuge (le modèle le plus couramment utilisé), le débit de pompage est influencé par la charge ; voir l'encadré 5.1 pour plus d'informations. À signaler que la pompe doit être installée plusieurs mètres au-dessous du niveau d'eau le plus bas escompté au cours de l'essai.

## Déroutement de l'essai à débit constant

Une fois que l'équipement est prêt et que les différentes tâches ont été attribuées, l'essai se déroule de la façon suivante :

1. Choisissez un point de référence (par ex. le bord supérieur du tubage) à partir duquel tous les relevés du niveau d'eau seront effectués, et mesurez le niveau d'eau résiduel. Le niveau doit être stable avant le début de l'essai, donc celui-ci ne doit pas être réalisé un jour où le forage vient d'être fait ou développé, ou lorsqu'un essai par paliers est effectué.
2. Ouvrez la vanne au réglage approprié et enclenchez simultanément la pompe et le chronomètre. Ne modifiez pas constamment le réglage de la vanne pour obtenir un débit particulier (par ex. un chiffre rond pour le nombre de litres par minute). Visez plutôt un débit approximatif et mesurez le débit réel (voir point 4 ci-dessous).
3. Mesurez le niveau d'eau dans le forage toutes les 30 secondes pendant les 10 premières minutes, puis toutes les minutes pendant 30 minutes, et enfin toutes les 5 minutes pendant 2 heures. Après 2 heures, observez la vitesse à laquelle le niveau d'eau baisse encore, et définissez une fréquence appropriée pour les relevés de niveau d'eau jusqu'à la fin de l'essai. Si le niveau d'eau baisse très lentement, un relevé toutes les 30 minutes ou même toutes les heures peut suffire. Si l'essai dure plusieurs jours, revoyez la fréquence des relevés en fonction du comportement du niveau d'eau. Si vous oubliez de mesurer le niveau d'eau au moment prévu, notez l'heure précise à laquelle le relevé est effectué. Consignez tous les relevés sur le formulaire standard (annexe E).
4. Mesurez le débit de pompage juste après le début de l'essai, puis à intervalles réguliers (toutes les 15 minutes paraît raisonnable pendant les premières heures, puis fixez une fréquence adéquate pour le reste de l'essai). S'il y a une accélération nette du rabattement, ou si la pompe fait un bruit différent, mesurez le débit à ces moments-là également. Si le débit de pompage

change de manière significative (disons plus de 10%), ajustez la vanne pour maintenir le débit de pompage le plus stable possible durant tout l'essai. Veuillez à ne pas trop corriger, ce qui aggraverait encore le problème.

5. À la fin de l'essai, débranchez la pompe, notez l'heure (ou redémarrez le chronomètre) et mesurez la remontée du niveau d'eau aux mêmes intervalles que ceux auxquels vous avez mesuré le rabattement. Continuez jusqu'à ce que l'eau soit remontée au niveau d'avant l'essai, ou en soit proche. Pour une explication détaillée du temps de remontée, voir le chapitre suivant.

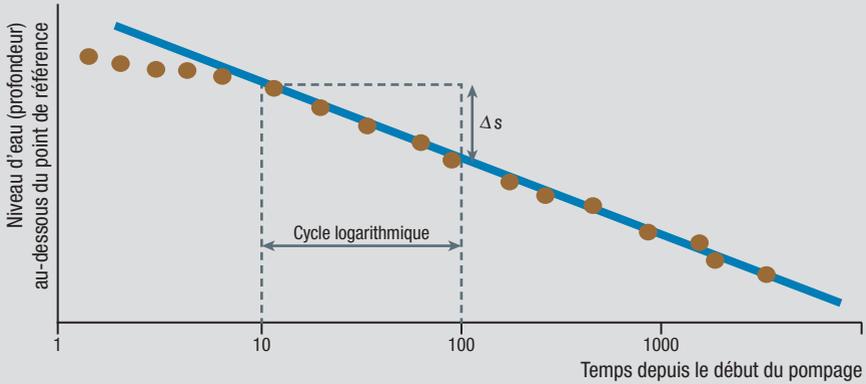
Si vous rencontrez un problème au cours de l'essai, par ex. une interruption de l'alimentation en énergie ou une panne de la pompe, utilisez votre bon sens : tout dépend du moment où le problème surgit et de sa durée probable. Par exemple, si l'incident survient pendant les premières minutes, attendez que le niveau d'eau remonte et recommencez. Si la panne se produit bien plus tard et peut être réglée rapidement, relancez la pompe et continuez. S'il faut beaucoup de temps pour résoudre le problème, il est peut-être préférable d'attendre la remontée complète du niveau d'eau avant de recommencer. Si des essais à débit constant de longue durée sont prévus, il est très important de s'assurer que la réserve de carburant est suffisante pour la durée totale de l'essai.

## Analyse et interprétation

La méthode d'analyse présentée ici s'appelle la droite de Jacob (ou de Cooper-Jacob). Elle se base sur une simplification de la méthode de Theis (voir annexe D pour plus de détails). La procédure est la suivante :

1. Préparez un graphique sur du papier millimétré semi-logarithmique en reportant les niveaux d'eau sur l'axe  $y$  (linéaire), en mètres au-dessous du point de référence, et le temps sur l'axe  $x$  (logarithmique), (en minutes, depuis le début du pompage). Voir la figure 5.1. Notez que si vous préférez, vous pouvez reporter les rabattements sur l'axe  $y$  à la place des niveaux d'eau – cela ne modifie pas l'analyse.

**Figure 5.1** Analyse de l'essai à débit constant



2. Reportez les niveaux d'eau en fonction du temps pour la durée de l'essai. Ces données devraient être plus ou moins alignées. Tracez la droite la mieux ajustée qui passe par ces points, en ignorant les premières données et en se concentrant sur les données relevées du milieu à la fin de l'essai.
3. À partir de cette droite, mesurez le paramètre  $\Delta s$ , qui est la différence de niveau d'eau (en mètres) pendant un cycle logarithmique (bien visible sur la figure 5.1).
4. Calculez le débit moyen de pompage sur la durée de l'essai,  $Q$  en  $\text{m}^3/\text{jour}$ .
5. Introduisez les valeurs de  $Q$  et  $\Delta s$  dans la formule ci-dessous pour calculer la transmissivité  $T$ . Assurez-vous que les unités correctes ont été utilisées, et  $T$  sera exprimé en  $\text{m}^2/\text{jour}$ .

$$T = 0.183 Q / \Delta s$$

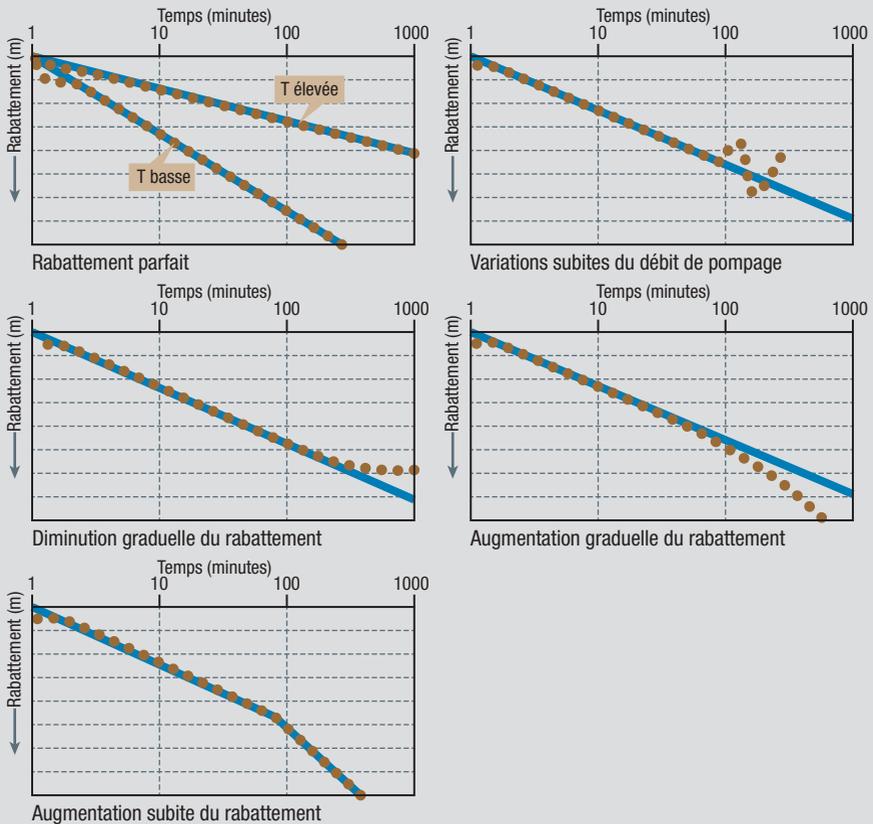
En traçant une droite par les différents points (voir point 2 ci-dessus), on a ignoré les premières données, car elles tendent à être influencées par le volume d'eau stocké dans le forage, et ces données ne seraient probablement pas tombées sur la droite. S'il y a d'autres écarts par rapport à la droite, les explications sont à rechercher avant tout dans des variations subites du débit de pompage ou de fortes

précipitations pendant l'essai. Divers types d'écart par rapport à la droite standard de Jacob sont couramment observés, comme le montre la figure 5.2 et comme décrit ci-dessous (la figure et les explications sont reprises de MacDonald *et al.* [2005]).

→ Diminution graduelle du rabattement: elle provient du fait que l'aquifère reçoit de l'eau d'une autre source, soit parce que l'aquifère est semi-captif, ou parce que le cône de dépression en expansion a intercepté une source de recharge, par ex. des eaux de surface. C'est un signe

**Figure 5.2** Écarts par rapport à la droite lors d'un essai à débit constant

(tiré de : MacDonald *et al.* [2005])



- encourageant si le forage doit être une source d'eau durable, et la transmissivité devrait être mesurée avec les données relevées avant l'apparition de l'infiltration.
- Augmentation graduelle du rabattement : elle indique que les caractéristiques de l'aquifère sont moins bonnes loin du forage et meilleures près de celui-ci. Cela peut être dû au fait que l'aquifère a une étendue limitée (en d'autres termes que le cône de dépression en expansion a rencontré une barrière hydraulique), ou que les parties peu profondes de l'aquifère sont dénoyées. Ce n'est pas un signe encourageant, car il indique que l'eau disponible est moins importante qu'on ne l'avait supposé. Si l'essai a été mené assez longtemps (pour que les données se stabilisent sur une nouvelle droite), calculez la transmissivité à partir des données les plus récentes.
  - Augmentation subite du rabattement : elle peut provenir du dénoyage d'une fracture importante ou de l'interception d'une barrière hydraulique. Un tel comportement est très préoccupant, car il indique que le forage pourrait s'assécher après une utilisation intense ou pendant la saison sèche. Mais tout n'est pas perdu, car le forage peut encore être utilisable à un débit de pompage plus faible.

Lors d'un essai à débit constant, il vaut la peine de faire un graphique grossier sur le terrain, pendant que l'essai est en cours, au cas où l'on constaterait de tels écarts. On peut alors décider d'augmenter ou de raccourcir la durée de l'essai ou d'essayer un débit de pompage différent.

Nous avons calculé la transmissivité en  $m^2$ /jour, mais on peut se demander ce que signifie cette valeur. Un résultat de  $10m^2$ /jour est-il bon ou mauvais ? La réponse dépend essentiellement du rendement souhaité pour le forage. MacDonald *et al.* (2005) ont élaboré des modèles en utilisant les hypothèses et les paramètres généralement appliqués aux pays émergents et sont arrivés à la conclusion que, pour qu'un forage fournisse 5 000 litres par jour (20 litres par personne pour 250 personnes), la transmissivité

de l'aquifère devrait être d'au moins  $1 \text{ m}^2/\text{jour}$ . Un aquifère ayant une transmissivité de  $10 \text{ m}^2/\text{jour}$  pourrait fournir près de 40 000 litres par jour. Par comparaison, un forage des services publics dans un aquifère de grès typique de l'Angleterre, qui peut fournir environ deux millions de litres par jour, aurait une transmissivité de 300 à  $400 \text{ m}^2/\text{jour}$  s'il était testé. Des aquifères très productifs, en mesure de supporter une extraction très importante, peuvent avoir une transmissivité de 1 000 à  $2\,000 \text{ m}^2/\text{jour}$ .

En fait, le calcul de la transmissivité est surtout utile pour faire une comparaison avec d'autres forages situés dans un environnement hydrogéologique ou une zone géographique semblables. C'est pourquoi il est important de conserver des relevés complets des essais de pompage. On peut se faire une idée générale du potentiel d'exploitation des eaux souterraines dans une certaine région à partir des résultats de nombreux essais, de préférence reportés sur une carte. Comme pour toutes les équations mathématiques, la méthode d'analyse décrite ici ne doit pas être appliquée aveuglément. Une comparaison avec d'autres essais devrait permettre de se rendre compte si les résultats d'un essai donné sont plausibles. Si la transmissivité calculée n'est pas du tout de l'ordre de grandeur des valeurs typiques mentionnées ci-dessus, c'est probablement que les unités introduites dans l'équation sont erronées, et il faut les vérifier.

Malheureusement, il n'existe pas de formule magique pour prédire le rendement maximal d'un forage à partir de paramètres tels que la transmissivité. Dans la pratique, le rendement stable à long terme dépend de nombreux facteurs, dont : l'hydrogéologie de la région (limites de l'aquifère, recharge, variations saisonnières du niveau d'eau, etc.), le type d'exploitation de l'aquifère (pompage intermittent ou continu), l'impact sur l'environnement et l'influence éventuelle qu'a l'extraction sur d'autres sources d'eau. Pour dresser un tableau du comportement du forage, il faudrait évaluer les données d'essais individuels en tenant compte d'informations générales et d'observations à long terme.



# **6. ESSAI DE REMONTÉE**

## Introduction

L'essai de remontée n'est pas un essai de pompage au sens strict du terme, car il consiste à observer la remontée de l'eau après l'arrêt du pompage. Nous l'avons déjà rencontré dans les étapes finales des essais par paliers et des essais à débit constant. Néanmoins, nous lui consacrons un chapitre particulier, car les données de remontée ne reçoivent pas toujours l'attention qu'elles méritent. Les essais de remontée sont dignes d'intérêt pour plusieurs raisons :

- ils permettent de vérifier les caractéristiques de l'aquifère déduites des essais de pompage, avec un minimum d'effort – il suffit de prolonger l'observation après que la pompe a été débranchée.
- Le début de l'essai est assez « net ». Normalement, en lançant un essai à débit constant, par exemple, on arrive rarement à passer d'un coup, par un saut net, au débit choisi. En général, il est beaucoup plus facile d'arrêter une pompe que de la faire démarrer, et le passage d'un débit de pompage constant à l'arrêt du pompage peut se faire assez nettement.
- De plus, la remontée aplanit les petites différences de débit survenues durant la phase de pompage, et il n'y a pas de problème de pertes de charge dues à des turbulences. Ceci permet une évaluation plus fiable des propriétés de l'aquifère lors de l'analyse des données de remontée.
- Le niveau d'eau de l'aquifère est plus facile à mesurer précisément en l'absence des turbulences causées par le pompage (surtout dans les premières phases de l'essai où les niveaux d'eau varient rapidement). Certaines personnes trouvent qu'il est plus facile de faire des relevés rapides par sonde manuelle lorsque le niveau monte plutôt que lorsqu'il baisse.
- L'essai de remontée est une option intéressante pour tester les forages opérationnels dans lesquels un pompage à débit constant a déjà été réalisé pendant de longues périodes. Dans ce cas, l'essai de remontée peut se faire lorsque les pompes sont arrêtées, puis on effectue un essai à débit constant lorsque les pompes sont rebranchées.

## Équipement et limites

L'équipement nécessaire à un essai de remontée est très simple (si l'on fait abstraction de l'équipement déjà en place pour le pompage qui a précédé l'essai de remontée):

- un chronomètre pour mesurer le temps de remontée;
- une sonde piézométrique pour mesurer le niveau d'eau (ou un capteur de pression avec enregistreur de données, si disponible);
- un carnet, ou un formulaire standard, et un crayon pour consigner les données de l'essai;
- du papier millimétré semi-logarithmique et une règle pour reporter les résultats.

Dans l'idéal, l'essai devrait durer le temps nécessaire à l'eau pour retrouver son niveau d'origine et, théoriquement, cela devrait correspondre à la durée de la phase de pompage du programme d'essai. Toutefois, dans la pratique, l'essai de remontée est souvent plus court, notamment pour des raisons de coûts (maintien de l'équipement et du personnel sur le site). Mais il ne devrait pas être trop court, car comme précisé pour l'essai à débit constant, les données provenant de la première partie de l'essai sont influencées par l'emmaisinement dans le puits. Si, sur le terrain, vous avez reporté grossièrement les données de l'essai à débit constant sur un papier semi-logarithmique, ce graphique vous donnera une idée du moment où les données deviennent utiles pour calculer la transmissivité (lorsqu'elles forment une droite).

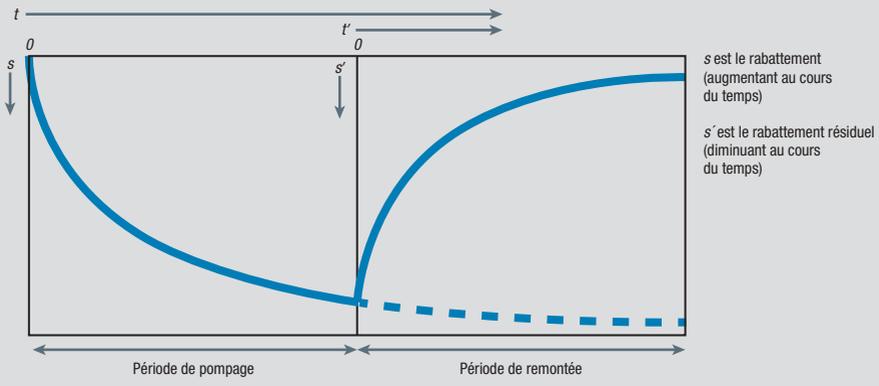
La pompe ne devrait pas être retirée du forage pendant l'essai de remontée, car le retrait subit du volume immergé de la pompe et de la colonne de refoulement modifiera brusquement le niveau d'eau dans le forage. Pour la même raison, il faut fixer une valve anti-retour (appelée clapet de pied dans ce contexte) à la base de la colonne de refoulement. Sans clapet de pied, le contenu de la colonne de refoulement va redescendre dans le forage lorsque la pompe est arrêtée et provoquer un changement subit du niveau d'eau dans le forage. Ceci dit, à moins que le clapet de pied ne puisse être ouvert depuis la surface, la colonne

de refoulement sera pleine d'eau, et donc lourde, lorsqu'elle sera sortie du forage. Donc, il n'est peut-être pas toujours aisé de faire un essai de remontée.

En théorie, la courbe de remontée devrait être l'image miroir (inversée) de la courbe de rabattement, si elle est mesurée à partir de la courbe de rabattement. Vous pouvez le voir à la figure 6.1, qui introduit aussi le concept de rabattement résiduel ( $s'$ ), la différence entre le niveau d'eau d'origine, avant le début du pompage et le niveau d'eau mesuré au temps ( $t'$ ) après l'arrêt de la pompe.

**Figure 6.1** Explication des termes de l'essai de remontée

(tiré de : Kruseman et de Ridder [1990])



Dans la pratique, le niveau d'eau ne regagnera peut-être pas son niveau d'origine, pour diverses raisons :

- l'aquifère peut avoir une étendue limitée et aucune recharge n'a eu lieu, auquel cas le niveau d'eau récupéré peut être plus bas que le niveau d'origine (inversement, si une recharge se produit pendant l'essai, la remontée peut se faire plus rapidement que prévu).
- Certains aquifères captifs ne sont pas totalement élastiques, et ils se comportent différemment lors de la remontée (coefficient d'emmagasinement différent).
- Dans les aquifères libres, de l'air peut être emprisonné dans des espaces poreux lorsque la partie denoyée de l'aquifère se remouille.

## Déroulement de l'essai de remontée

La procédure à suivre est la suivante :

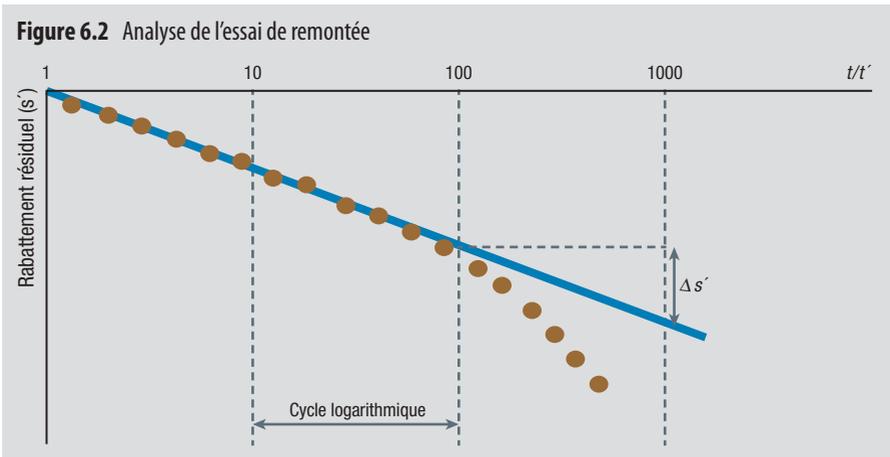
1. Débranchez la pompe et enclenchez le chronomètre simultanément.
2. Mesurez le niveau d'eau dans le forage comme au début de l'essai de pompage, c'est-à-dire toutes les 30 secondes pendant les 10 premières minutes, puis toutes les minutes pendant 30 minutes, enfin toutes les 5 minutes pendant 2 heures. Après 2 heures, observez la vitesse à laquelle le niveau d'eau monte encore, et définissez une fréquence appropriée pour les relevés du niveau d'eau jusqu'à la fin de l'essai. Si le niveau d'eau monte très lentement, un relevé toutes les 30 minutes ou même toutes les heures peut être suffisant. Si vous oubliez de mesurer le niveau d'eau au moment prévu, notez l'heure précise à laquelle le relevé est effectué. Consignez tous les relevés sur le formulaire standard (annexe E). Assurez-vous que pour mesurer les niveaux d'eau, vous utilisez le même point de référence que dans la phase de pompage.

## Analyse et interprétation

Les méthodes d'analyse prévues pour les essais de remontée ne peuvent être utilisées que si le débit de pompage a été constant au cours de la phase de pompage et si le niveau d'eau a atteint l'équilibre ou s'en est rapproché. Il est donc préférable de mesurer les remontées après un essai à débit constant de longue durée (plutôt qu'après un essai par paliers). À nouveau, nous présentons ici une méthode d'analyse simple, le lecteur étant renvoyé à la bibliographie (annexe D) pour des méthodes plus complexes. La procédure d'analyse des données de remontée est la suivante :

1. Prenez tous les niveaux d'eau mesurés pendant la phase de remontée (en mètres au-dessous du point de référence) et convertissez-les en rabattements résiduels ( $s'$ ) en soustrayant le niveau d'eau résiduel d'origine mesuré juste avant le début de la phase de pompage.

2. Le temps écoulé depuis le début de la phase de remontée (en minutes) est indiqué par  $t'$ . Pour tous les rabattements résiduels, calculez  $t$ , qui est le temps écoulé depuis le début de l'essai de pompage (en minutes, comme illustré à la figure 6.1). Par exemple, si la phase de pompage a duré 600 minutes, pour les relevés de remontée pris aux points  $t'$  à 1, 10 et 100 minutes, les temps respectifs  $t$  seraient de 601, 610 et 700 minutes.
3. Divisez  $t$  par  $t'$  pour tous ces couples de temps.
4. Préparez un graphique sur du papier millimétré semi-logarithmique en mettant le rabattement résiduel  $s'$  sur l'axe y (linéaire), en mètres, et  $t/t'$  sur l'axe x (logarithmique). Voir la figure 6.2.



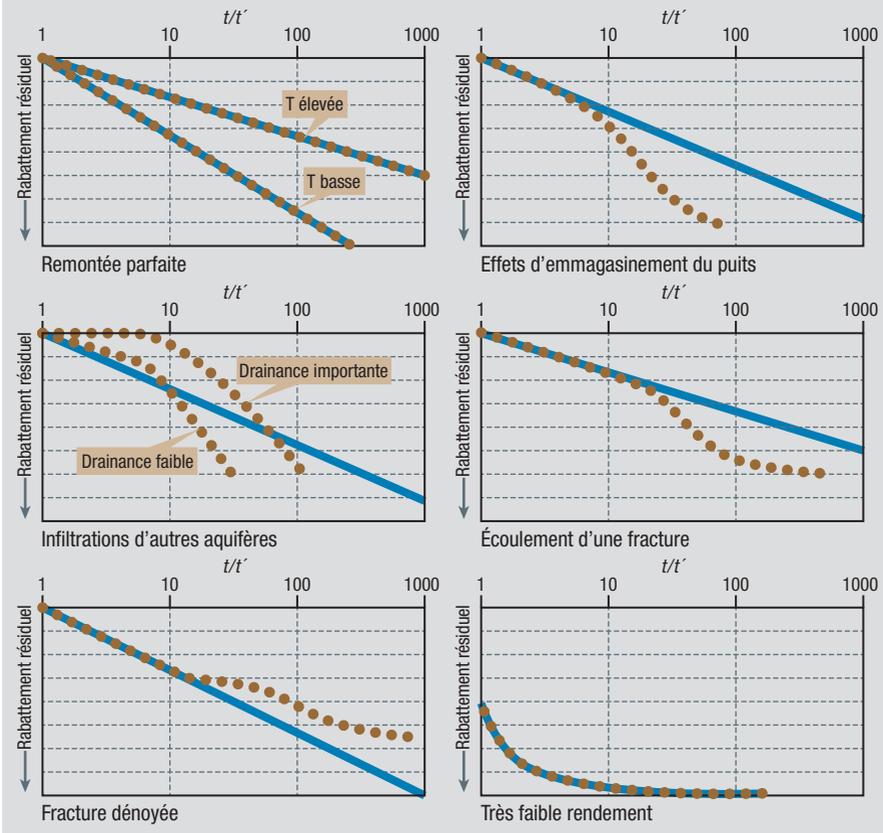
5. Portez  $s'$  en fonction de  $t/t'$  pour toute la durée de l'essai, en n'oubliant pas que sur ce graphique, le temps va de droite à gauche. En gros, les données devraient constituer une droite. Tracez la droite la mieux ajustée qui passe par les points en ignorant les premières données (à droite) et en vous concentrant sur les données du milieu vers la gauche. Normalement, la courbe devrait tendre vers  $t/t' = 1$  lorsque  $s' = 0$ .

6. À partir de cette droite, mesurez le paramètre  $\Delta s'$ , qui est la différence de rabattement résiduel (en mètres) pendant un cycle logarithmique (clairement explicité par la figure 6.2).
7. Calculez le débit moyen de pompage pour la durée de la phase de pompage de l'essai,  $Q$ , en  $\text{m}^3/\text{jour}$ . Ce calcul a déjà dû être fait pour l'analyse de l'essai à débit constant.
8. Introduisez les valeurs de  $Q$  et  $\Delta s'$  dans la formule ci-dessous pour calculer la transmissivité  $T$ . Assurez-vous que les unités correctes ont été utilisées, et vous devez obtenir  $T$  en  $\text{m}^2/\text{jour}$ .

$$T = 0.183 Q / \Delta s'$$

Comme dans l'analyse de l'essai à débit constant, les premières données ont été ignorées, car elles sont influencées par le volume d'eau emmagasiné dans le forage même, et leurs points ne tomberaient probablement pas sur la droite. Divers types d'écarts par rapport à la droite sont couramment observés, comme le montre la figure 6.3 et ils s'expliquent de la façon suivante :

- effets d'emmagasinement du puits: le niveau d'eau ne remonte pas aussi rapidement qu'il devrait le faire en théorie, parce que de l'eau sert à remplir le volume du forage lui-même.
- Drainance à partir d'autres aquifères: l'aquifère testé reçoit de l'eau d'autres aquifères ou couches de l'aquifère par une infiltration verticale.
- Fracture ruisselante: lorsque le niveau d'eau remonte, il finit par submerger une fracture d'où ruisselait de l'eau (lorsque le niveau d'eau était en dessous de la fracture).
- Fracture dénoyée: le débit de remontée est influencé par le fait qu'une fracture a été dénoyée pendant la phase de pompage.
- Très faible rendement: la remontée est très lente, et l'eau est probablement absorbée principalement par le remplissage du volume du forage.

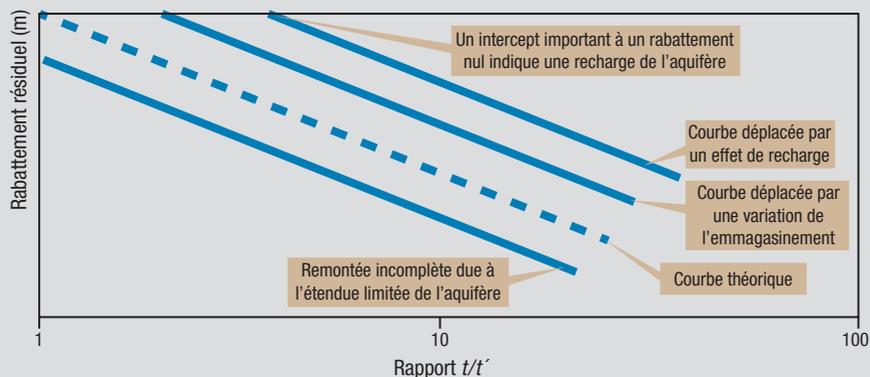
**Figure 6.3** Écarts par rapport à la droite lors de l'essai de remontée(MacDonald *et al.*, [2005])

Sur le graphique, la droite peut différer du tracé prévu d'autres manières, si les conditions réelles dans l'aquifère sont différentes des conditions théoriques, comme le montre la figure 6.4.

Todd (1980) souligne que la vitesse initiale de remontée après l'arrêt du pompage peut être un critère pour reconnaître un forage inefficace. Si le forage n'est pas efficace, les pertes de charge dans le puits seront grandes, et cette composante du rabattement va récupérer rapidement en drainant de l'eau de l'aquifère dans le forage. Todd estime qu'à vue de nez, si une pompe est arrêtée après 1 heure de

**Figure 6.4** Différences entre les conditions réelles et théoriques dans l'aquifère

(Driscoll [1986])



pompage et que le rabattement se rétablit à 90 % ou plus en 5 minutes, on peut en conclure que le forage est d'une inefficacité inacceptable.

Comme mentionné à la fin du chapitre précédent, la méthode d'analyse décrite ici ne doit pas être appliquée aveuglément, et une comparaison avec d'autres essais (notamment l'essai à débit constant effectué juste avant l'essai de remontée) devrait permettre de se rendre compte si les résultats obtenus sont plausibles.

## Essai de puisage

L'essai de puisage (au tube à clapet) est un essai spécial conçu pour être effectué manuellement avec un équipement simple (une pompe motorisée n'est pas nécessaire). Ses résultats peuvent être analysés avec une formation minimale et permettent de se rendre compte si le forage a des chances de réussite lorsqu'il est équipé d'une pompe à main. Nous le mentionnons ici parce que cette analyse se fait au moyen des données de remontée. L'essai de puisage ne sera probablement pas utilisé très souvent par les ingénieurs WatHab du CICR, mais des détails complets sont donnés à l'annexe F pour information. Il s'agit peut-être du seul essai qu'il est possible d'effectuer dans des endroits très retirés ou dans des aquifères ayant une très faible perméabilité.



Marc Bleich / CCR

# **7. COMMENTAIRES FINAUX**

## Puits de grand diamètre

L'une des hypothèses théoriques à la base de presque toutes les méthodes d'analyse des essais de pompage est que le volume d'eau emmagasiné dans le forage ou le puits est négligeable. Lorsque nous avons décrit l'analyse des essais à débit constant et des essais de remontée dans les chapitres précédents, nous avons souligné que les données des premières phases de l'essai sont souvent influencées par l'emmagasinement et ne devraient donc pas être incluses dans l'analyse. Pour les puits d'un grand diamètre, toutefois, l'hypothèse d'un emmagasinement négligeable s'effondre totalement, et il est très difficile d'analyser les données d'essais de pompage de manière significative (en tout cas sans ordinateur). Réaliser des essais dans un puits de grand diamètre présente aussi des difficultés pratiques, car, à moins d'utiliser une pompe de grande capacité, il est difficile d'induire un rabattement suffisant en peu de temps, et le comportement de l'eau est dominé par le gros volume d'emmagasinement. Pour ce type de puits, l'approche la plus pragmatique consiste à se concentrer sur les points suivants :

- les connaissances de la population: avec l'aide de la communauté locale, essayez de déduire un rendement approximatif en comptant le nombre de récipients (d'un volume connu) qui sont remplis chaque jour au puits. Comment le niveau d'eau réagit-il au puisage d'une telle quantité? L'eau peut-elle être puisée à n'importe quel moment de la journée, ou faut-il laisser au puits le temps de se remplir à nouveau? Comment ce comportement se modifie-t-il pendant la saison sèche? Quels sont les niveaux d'eau résiduels typiques à la saison des pluies et à la saison sèche? Utilisez une version simplifiée du diagramme de performance (figure 4.3) pour résumer et visualiser ces informations.
- Débit de remontée: pompez l'eau du puits le plus rapidement possible, jusqu'à ce que le puits soit pratiquement vide, puis observez la remontée du niveau d'eau (en utilisant une sonde piézométrique et un chronomètre). En se basant sur une estimation des dimensions

du puits, vous pouvez établir un « rendement » approximatif en [volume] par [temps]. Il va de soi que cet essai doit être réalisé avec l'accord de la communauté locale, afin de ne pas priver cette dernière de sa source d'eau à un moment critique. Il serait judicieux d'évacuer l'eau de manière à ce qu'elle puisse être utilisée et ne soit pas gaspillée.

### **Choix de l'essai de pompage**

Face à un forage ou un puits donné, quel type d'essai de pompage un ingénieur WatHab doit-il effectuer ? Cette question sera traitée dans le dernier chapitre, car la réponse dépend des divers facteurs, hypothèses, limites, contraintes de l'équipement, méthodes d'analyse et incertitudes que nous avons décrits dans ce guide. Le tableau 7.1 rassemble toutes les informations importantes et offre aux ingénieurs Wathab un guide de référence rapide à consulter.

**Tableau 7.1** Guide pour le choix d'essais de pompage dans différentes situations

Type d'essai	Paramètres tirés des essais (en utilisant des méthodes d'analyse simples)	Durée totale habituelle de l'essai	Limites de l'essai
<b>Essai par paliers</b>	Rabatement spécifique. Capacité spécifique Évaluation qualitative de la performance du forage (rendement-rabatement). Débit de pompage pour essai à débit constant.	1 jour	Il faut pouvoir changer le débit de pompage. Pas optimal pour prédire le comportement à long terme de l'aquifère.
<b>Essai à débit constant</b>	Transmissivité de l'aquifère. Coefficient d'emmagasinement, si forage d'observation disponible. Évaluation qualitative de la capacité à maintenir le rendement prévu.	De 1 ou 2 jours à 1 ou 2 semaines	Difficile de garder un débit de pompage constant. Les paramètres de l'aquifère peuvent varier entre la saison des pluies et la saison sèche. Nécessite un bon système d'évacuation.
<b>Essai de remontée</b>	Transmissivité de l'aquifère. Évaluation qualitative des pertes de charge dans le puits (liées à l'efficacité du forage).	Plusieurs heures à plusieurs jours	Un clapet de pied doit être fixé à la colonne de refoulement. La pompe ne peut pas être enlevée pendant l'essai.
<b>Essai de puisage</b>	Évaluation qualitative pour voir si le forage peut être équipé d'une pompe manuelle.	Plusieurs heures	Le niveau d'eau devrait être à moins de 15-20 m de profondeur. Pas approprié pour des aquifères à forte perméabilité ou des forages de grand diamètre.

<b>Applicabilité dans certaines situations</b>		
<b>Petit forage (à équiper d'une pompe manuelle)</b>	<b>Forage moyen (pompe motorisée, desservant une communauté moyenne)</b>	<b>Grand forage (pompe motorisée desservant une grande communauté)</b>
Utilisable si la pompe fonctionne à de petits débits (et que le débit peut être modifié).	Utilisable et recommandé si l'on dispose d'un moyen adéquat pour modifier le débit de pompage.	Tout à fait utilisable et un élément essentiel du programme d'essais de pompage. Répéter l'essai pour détecter les variations de performance. Un entrepreneur sera probablement nécessaire.
Utilisable si un débit de pompage constant peut être maintenu avec une petite pompe.	Tout à fait utilisable, c'est un essai essentiel. Le débit de pompage doit être égal ou supérieur au débit d'exploitation prévu.	Tout à fait utilisable, c'est un essai essentiel. Le débit de pompage doit être égal ou supérieur au débit d'exploitation prévu. Un entrepreneur sera probablement nécessaire.
Utilisable si un essai à débit constant a été réalisé. L'essai de puisage (ci-dessous) est une forme d'essai de remontée.	Tout à fait utilisable et recommandé comme complément à l'essai à débit constant.	Tout à fait utilisable et un essai essentiel à effectuer après l'essai à débit constant.
Tout à fait utilisable; en fait l'essai de puisage est spécialement conçu pour ce type de forage.	Pas utilisable	Pas utilisable

## Gestion des entrepreneurs

S'ils disposent de la formation, de l'expérience et de l'équipement adéquats, les collaborateurs du CICR peuvent réaliser tous les essais décrits dans ce guide. Toutefois, nous reconnaissons qu'il peut être nécessaire d'avoir recours à des entrepreneurs spécialisés pour effectuer certains essais de pompage, surtout dans de grands forages impliquant de forts débits ou de longues périodes de pompage. Qu'elle soit appliquée en interne ou par un entrepreneur, la procédure à suivre pour réaliser et analyser un essai de pompage est essentiellement la même. L'ingénieur WatHab qui doit engager et superviser un entrepreneur trouvera à l'annexe G une liste de points à vérifier, présentés sous forme de questions. Notez que les questions ne s'appliquent pas toutes à chaque situation. L'annexe G comprend aussi une autre liste, où la plupart de ces questions sont reformulées sous forme d'énoncés que l'ingénieur WatHab peut reprendre (lorsqu'ils sont pertinents) dans le cahier des charges de l'entrepreneur.

## Erreurs courantes

Les erreurs le plus fréquemment commises lors d'un essai de pompage sont les suivantes :

- Ne pas se renseigner à l'avance pour savoir si les aménagements de surface laissent un accès pour l'équipement d'observation et une pompe temporaire.
- Mal choisir la taille de la pompe pour l'essai. Trop petite, elle ne pourra pas causer un rabattement suffisant. Trop grande, elle risque de pomper à vide.
- Ne pas installer la pompe assez profondément dans le forage si bien que la pompe tourne à vide avant la fin de l'essai.
- Installer la pompe trop profondément dans le forage si bien qu'il n'y a pas suffisamment d'espace entre l'admission de la pompe et le fond du forage.
- Réserve insuffisante de carburant (si un générateur est utilisé), si bien que l'essai est interrompu.
- Pas de piles de rechange pour la sonde piézométrique et d'autres appareils d'observation.

- Ne pas avoir expérimenté les débits de pompage à l'avance, si bien qu'il faut plusieurs tentatives pour parvenir à un débit stable.
- Déverser l'eau trop près du forage testé, si bien qu'elle pénètre à nouveau dans le forage.
- L'interprétation de l'essai est très difficile, car les niveaux d'eau sont influencés par d'autres extractions, les marées ou de fortes précipitations au cours de l'essai.
- Réaliser l'essai au mauvais moment de l'année (trop d'humidité ou trop de sécheresse).
- Des personnes différentes utilisent des points de référence différents pour les mesures, si bien que les résultats obtenus pour le niveau d'eau ne sont pas cohérents.
- Oublier d'apporter du matériel essentiel sur un site éloigné, ou prendre un équipement qui n'a pas été testé ou ne fonctionne pas correctement.
- Ne pas vous familiariser avec l'équipement à l'avance (ne pas savoir comment l'utiliser correctement).
- Ne pas fixer de valve anti-retour (clapet de pied) sur la colonne de refoulement, si bien que les résultats de l'essai de remontée sont faussés.

Toutes ces erreurs peuvent être évitées grâce à une planification et une préparation rigoureuses, pour lesquelles la liste de l'annexe G est un aide-mémoire utile.

### **Suivi à long terme**

Enfin, quelques mots au sujet du suivi à long terme. L'importance des informations générales et de l'historique des niveaux d'eau a été soulignée au chapitre 3, qui porte sur la planification des essais de pompage. Si l'on se tourne vers l'avenir, le même principe s'applique. Il est très difficile de bien comprendre un système d'eaux souterraines ou une source particulière en se fondant uniquement sur un programme d'essais de pompage relativement court. Même un essai à débit constant de plusieurs semaines est court par rapport à la durée d'exploitation du forage. L'eau souterraine est souvent lente à réagir à des « événements » tels que la recharge et l'extraction, et des données à long terme sur les niveaux d'eau



Photo 13 : Marquage du point de référence en annotant la photo

et les débits de pompage sont essentielles pour acquérir une connaissance approfondie de l'« efficacité » ou de la productivité optimale d'un forage ou d'un puits particulier. Il est fortement recommandé d'élaborer un programme de suivi à long terme, en s'inspirant des conseils pratiques suivants :

- gardez des relevés détaillés, chaque forage étant clairement identifié par un nom ou un numéro de référence unique et toutes les données, informations, photos, notes de terrain et rapports sur le forage étant précisément référencés, pour éviter toute confusion.
- Pour les observations du niveau d'eau, assurez-vous que le même point de référence est utilisé à chaque fois (pour indiquer le niveau d'eau, en mètres au-dessous du point de référence), surtout si différentes personnes prennent les relevés. Marquez clairement le point de référence, ou enregistrez-le au moyen d'une photo ou d'un diagramme. Si le point de référence doit être déplacé, consignez-le et ajustez d'autant les mesures du niveau d'eau.
- Assurez-vous que les unités sont spécifiées pour tous les paramètres à observer, et soyez attentifs lorsque vous convertissez des unités pour effectuer des calculs.
- Utilisez un diagramme de performance (voir figure 4.3) comme outil pour résumer et visualiser les données de suivi à long terme ainsi que les données d'un essai individuel de pompage.
- Lorsque vous construisez un nouveau forage ou que vous en réhabilitez un ancien, n'oubliez pas de prévoir des points d'accès pour les essais futurs.

# ANNEXES

## Annexe A Glossaire

**Aquiclude :** formation géologique relativement imperméable à l'eau.

**Aquifère :** couche ou couches souterraines de roche ou autres strates géologiques d'une porosité et perméabilité suffisantes pour permettre un écoulement significatif d'eau souterraine ou l'extraction de quantités significatives d'eau souterraine.

**Aquifère captif :** aquifère saturé qui est isolé de l'atmosphère par une formation imperméable sus-jacente (un aquiclude).

**Aquifère libre :** aquifère où la surface de la nappe est exposée à l'atmosphère car surmontée de terrains non saturés.

**Aquifère semi-captif :** aquifère dont la limite supérieure (ou inférieure) est un aquitard.

**Aquitard :** formation géologique peu perméable qui ne fournit pas d'eau par elle-même, mais qui peut laisser passer des quantités d'eau importantes vers des aquifères adjacents ou à partir de ceux-ci.

**Capacité de stockage :** mesure sans référence au temps (aussi appelé coefficient d'emmagasinement) qui est le rapport du volume d'eau libérée (ou emmagasinée) par unité de surface de l'aquifère sur la variation de charge hydraulique (par unité).

**Capacité spécifique :** quantité d'eau que peut produire un forage par unité de rabattement.

**Conductivité hydraulique :** mesure de la vitesse à laquelle l'eau traverse un milieu poreux (la transmissivité est la conductivité hydraulique multipliée par l'épaisseur saturée).

**Cône de dépression :** dépression dans la nappe d'eau ou la surface piézométrique aux alentours d'un forage d'eau souterraine (à forme plus ou moins conique, centré sur l'extraction).

**Extraction :** prélèvement d'eau dans des eaux souterraines ou des eaux de surface, généralement par pompage.

**Flux laminaire :** eau coulant sans turbulences en couches fines, sans mélange entre les couches.

**Flux turbulent :** écoulement où les particules d'eau suivent des trajets désordonnés et se mélangent totalement.

**Interférence :** extraction d'eau qui diminue la quantité d'eau fournie par une extraction voisine, ou qui augmente le rabattement nécessaire.

**Porosité :** proportion d'une roche ou d'une masse sédimentaire formée de vides ou pores ; l'eau souterraine demeure ou s'écoule dans ces pores.

**Rabattement :** distance verticale entre la surface statique de l'eau ou surface piézométrique (niveau d'eau résiduel) et la surface du cône de dépression.

**Recharge :** processus par lequel de l'eau (provenant en général de précipitations) vient s'ajouter à l'eau souterraine, ou quantité d'eau ajoutée à l'eau souterraine pendant une période donnée.

**Remontée :** période suivant l'arrêt de la pompe dans un forage, pendant laquelle l'eau remonte à son niveau au repos.

**Surface de la nappe :** surface d'une nappe libre d'eau souterraine où la pression est égale à la pression atmosphérique.

**Transmissivité :** mesure la facilité avec laquelle l'eau s'écoule dans un aquifère saturé (produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur de l'aquifère).

Le lecteur peut consulter la bibliographie (annexe D) pour plus d'informations sur tous ces termes.

## Annexe B Liste des photos

1. Réalisation d'un forage	12
2. Sonde piézométrique manuelle	18
3. Installation d'un capteur de pression	19
4. Seau et chronomètre	21
5. Débitmètre	21
6. Compteur d'eau	21
7. Réservoir - déversoir	22
8. Réservoir - déversoir artisanal	22
9. Turbidimètre manuel	29
10. Preuve de la présence de sable	31
11. Robinet à opercule sur la conduite de refoulement	36
12. Évacuation dans les eaux de surface	49
13. Marquage du point de référence en annotant la photo	76

## Annexe C Liste des figures et des tableaux

3.1 Diagramme de la construction du forage	25
4.1 Schéma de l'essai par paliers	34
4.2 Analyse de l'essai par paliers	40
4.3 Diagramme de performance du forage	43
4.4 Détérioration du forage	45
5.1 Analyse de l'essai à débit constant	54
5.2 Écarts par rapport à la droite lors de l'essai de remontée	55
6.1 Explication des termes de l'essai de remontée	62
6.2 Analyse de l'essai de remontée	64
6.3 Écarts par rapport à la droite lors de l'essai de remontée	66
6.4 Différences entre les conditions réelles et théoriques dans l'aquifère	67
7.1 Guide pour le choix d'essais de pompages dans différentes situations	72

## Annexe D Références et lectures

### RÉFÉRENCES (sources mentionnées dans le texte)

BS ISO 14686:2003: *Hydrometric Determinations – Pumping Tests for Water Wells – Considerations and Guidelines for Design, Performance and Use*. British Standard.

Clark L. (1977). "The analysis and planning of step drawdown tests." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.10, pp.125-143.

Driscoll F. (1986). *Groundwater and Wells*. 2<sup>e</sup> édition, St Paul, MN, Johnson Filtration Systems Inc.

Foster S., Chilton J., Moench M., Cardy F. and Schiffler M. (2000). *Groundwater in Rural Development: Facing the Challenges of Supply and Resource Sustainability*. Technical Paper No. 463, World Bank, Washington DC, mars 2000.

Kruseman G. and de Ridder N. (1990). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2<sup>e</sup> édition, Publication 47, Wageningen, Netherlands, International Institute for Land Reclamation and Improvement.

MacDonald A., Davies J., Calow R. and Chilton J. (2005). *Developing Groundwater: A Guide for Rural Water Supply*. Bourton on Dunsmore, Practical Action Publishing.

MacDonald A., Barker J. and Davies J. (2008). "The bailer test: A simple effective pumping test for assessing borehole success." *Hydrogeology Journal*, Vol. 16, n° 6, pp. 1065-1075, septembre 2008.

Todd D. (1980). *Groundwater Hydrology*. 2<sup>e</sup> édition, Chichester, John Wiley & Sons.

### AUTRES LECTURES

Effectuer des essais de pompage dans des forages et des puits est depuis longtemps une technique courante pour déterminer les caractéristiques d'un forage et les propriétés de l'aquifère, et de ce fait, il existe de nombreux ouvrages sur le sujet. Le lecteur est renvoyé notamment aux publications suivantes :

- BS ISO 14686:2003, *Hydrometric Determinations. Pumping Tests for Water Wells. Considerations and Guidelines for Design, Performance and Use*. Il s'agit d'une version actualisée de la norme britannique code de bonnes pratiques pour les essais de pompage dans les puits, et elle décrit bien comment planifier, réaliser et présenter les données des essais de pompage.
- Driscoll F. (2008), *Groundwater and Wells*, 3<sup>e</sup> édition, publiée par Smyth Companies. Se trouve dans la bibliothèque de la plupart des hydrogéologues (en tout cas les éditions précédentes); ce manuel complet décrit concrètement tous les aspects de la conception, de la réalisation, du développement et de l'équipement des forages et des puits ainsi que les essais de pompage.
- Kruseman G. P. and de Ridder N. A. (1990), *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*, 2<sup>e</sup> édition, publiée par International Institute for Land Reclamation and Improvement. C'est le manuel standard sur l'analyse et l'évaluation des essais de pompage, qui couvre toutes les situations: captif, libre, semi-captif, stable, instable, anisotropie, système à couches multiples, pénétration partielle, etc. Il comprend également des études de cas.

Pour des informations générales sur tous les aspects de l'hydrogéologie, il existe un grand choix de livres. Voici une sélection utile :

- Brassington R. (2007), *Field Hydrogeology*, 3<sup>e</sup> édition, publié par Wiley & Sons. Un manuel apprécié, présentant des méthodes pratiques pour des travaux hydrogéologiques sur le terrain; comprend un chapitre consacré aux essais de pompage.

- Fetter C. (2001), *Applied Hydrogeology*, 4<sup>e</sup> édition, publié par Pearson Education. un bon manuel pour ceux qui recherchent une approche plus mathématique de l'hydrogéologie et plus de données chimiques sur l'eau.
- Freeze R. and Cherry J. (1979), *Groundwater*, publié par Prentice-Hall. L'un des manuels les plus connus sur les eaux souterraines, qui est devenu un classique.
- Price M. (1996), *Introducing Groundwater*, 2<sup>e</sup> édition, publié par Chapman & Hall. Manuel d'introduction très accessible sur les eaux souterraines; comprend un chapitre qui expose les essais de pompage avec des informations théoriques sur l'hydraulique des eaux souterraines
- Todd D. and Mays L. (2005), *Groundwater Hydrology*, 3<sup>e</sup> édition, publié par Wiley & Sons. Version mise à jour d'un manuel classique facile à lire et instructif, et qui reste souvent cité comme ouvrage de référence.

Quelques livres sur l'hydrogéologie en Afrique :

- Adelana S. and MacDonald A. (eds) (2008), *Applied Groundwater Studies in Africa*, publié par Balkema. C'est le 13<sup>e</sup> dossier sur l'hydrogéologie d'une série sélectionnée par l'International Association of Hydrogeologists. Le chapitre 9 comprend un article très utile sur l'hydrogéologie et l'approvisionnement en eau des zones rurales en Afrique, et notamment un résumé du potentiel en eaux souterraines des environnements hydrogéologiques principaux.
- MacDonald A., Davies J., Calow R. and Chilton J. (2005), *Developing Groundwater*, publié par Practical Action Publishing. Mentionné plusieurs fois dans ce guide, il est complémentaire aux différents manuels et fournit des conseils très pratiques
- Wright E. P. and Burgess W. G. (eds) (1992), *The Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa*, Special Publication No. 66, Geological Society of London. Une série d'articles sur les recherches effectuées essentiellement au Malawi et au Zimbabwe.

Enfin, quelques sites Internet où l'on trouve des informations utiles :

- [www.iah.org](http://www.iah.org) (Association Internationale des Hydrogéologues)
- [www.groundwateruk.org](http://www.groundwateruk.org) (UK Groundwater Forum)
- [www.igrac.nl](http://www.igrac.nl) (International Groundwater Resources Assessment Centre)
- [www.whymap.org](http://www.whymap.org) (Worldwide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme)
- [www.africanwater.org](http://www.africanwater.org) (African Water Page)
- [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org) (voir sous GW-MATE pour des notes d'informations de la Banque mondiale [en anglais])
- [www.ramsar.org](http://www.ramsar.org) (Convention de Ramsar sur les zones humides)

## **Annexe E** Formulaires standard

L'annexe E vous présente des formulaires standard pour enregistrer les informations suivantes :

- informations de base sur le forage
- données des essais par paliers
- données des essais à débit constant
- données des essais de remontée

Imprimez ou photocopiez le nombre d'exemplaires vierges dont vous avez besoin.

## Formulaire pour les informations de base sur le forage

<b>Nom du forage :</b>	
<b>Nom de la personne remplissant le formulaire :</b>	
<b>Date à laquelle le formulaire est rempli :</b>	
<b>Emplacement du forage :</b> (village, paroisse, district, etc.)	
<b>Coordonnées géographiques ou latitude/longitude :</b>	
<b>Profondeur totale du forage :</b>	
<b>Diamètre du forage :</b>	
<b>Construction du forage :</b> (décrivez les éléments connus : tubage, crépine, massif filtrant, etc.)	
<b>Type de pompe installé :</b>	
<b>Profondeur de l'admission de la pompe :</b>	
<b>Tout autre renseignement pertinent :</b>	

### Dessinez une carte montrant l'emplacement du forage :

(avec des points de repère tels que bâtiments, clôtures, arbres, routes et, si possible, l'emplacement d'autres forages ou particularités hydrauliques de la région).

**Formulaire pour les données de l'essai par paliers**

Nom du forage :	Emplacement du forage :
Date de l'essai :	Nom de la personne remplissant le formulaire :
Niveau d'eau résiduel (m en dessous du point de référence) :	Numéro de ce palier :
Heure de début de ce palier :	Durée prévue du palier :
Débit de pompage visé pour ce palier :	Débit de pompage moyen calculé pour ce palier :

Temps écoulé depuis le début du palier (minutes)	Niveau d'eau (m au-dessous de la référence)	Rabatement calculé (m)	Débit de pompage	Commentaires
0,5				
1				
1,5				
2				
2,5				
3				
3,5				
4				
4,5				
5				
5,5				
6				
6,5				
7				
7,5				
8				
8,5				
9				
9,5				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				



**Formulaire pour les données de l'essai à débit constant**

Nom du forage :	Emplacement du forage :
Date de l'essai :	Nom de la personne remplissant le formulaire :
Niveau d'eau résiduel (m au-dessous du point de référence) :	Heure du début de l'essai :
Débit de pompage visé :	Débit de pompage moyen calculé :

Temps écoulé depuis le début de l'essai (minutes)	Niveau d'eau (m au-dessous de la référence)	Rabattement calculé (m)	Débit de pompage	Commentaires
0,5				
1				
1,5				
2				
2,5				
3				
3,5				
4				
4,5				
5				
5,5				
6				
6,5				
7				
7,5				
8				
8,5				
9				
9,5				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				



**Formulaire pour les données de l'essai de remontée**

Nom du forage :	Emplacement du forage :
Date de l'essai :	Nom de la personne remplissant le formulaire :
Niveau d'eau résiduel d'origine (en m au-dessous de la référence) :	Heure du début de la remontée :
Débit moyen de pompage au cours de la phase de pompage :	Durée de la phase de pompage (minutes) :

Temps écoulé depuis le début de la remontée $t'$ (minutes)	Niveau d'eau (m au-dessous de la référence)	Rabattement résiduel calculé $s'$ (m)	Temps écoulé depuis le début du pompage, $t$ (minutes)	Rapport calculé $t/t'$	Commentaires
0,5					
1					
1,5					
2					
2,5					
3					
3,5					
4					
4,5					
5					
5,5					
6					
6,5					
7					
7,5					
8					
8,5					
9					
9,5					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					



## Annexe F Essai de puisage

### Introduction

L'essai de puisage (au tube à clapet) est un essai simple conçu spécifiquement pour les projets ruraux d'approvisionnement en eau dans les pays en développement. Il ne nécessite qu'un équipement manuel de base et peut être réalisé après une formation minimale. L'essai consiste à prélever de l'eau dans un forage avec des tubes à clapet pour abaisser le niveau d'eau et observer ensuite comment l'eau remonte à son niveau d'origine. Des méthodes semblables sont utilisées depuis de nombreuses années, souvent sous le nom de « slug tests », mais une méthode systématique et pratique pour effectuer l'essai de puisage a maintenant été mise au point et publiée. Le *British Geological Survey* a testé cette méthode de manière intensive au Nigéria, montrant que l'essai au tube à clapet est presque aussi efficace que des essais à débit constant plus longs pour prédire la probabilité de réussite d'un forage. La majeure partie de la matière de l'annexe F est tirée de MacDonald *et al.* (2005) et (2008), qui estime qu'un forage est une réussite s'il peut alimenter une pompe manuelle desservant 250 personnes avec un volume de 20 litres par personne et par jour, soit un rendement de 5 m<sup>3</sup> par jour. Le CICR préfère fixer le seuil de rendement à 8 - 10 m<sup>3</sup> par jour, et la méthode présentée ici a été ajustée pour correspondre à ce seuil plus élevé.

L'essai de puisage est particulièrement bien adapté à des aquifères de faible perméabilité, qui sont courants dans l'Afrique sub-saharienne, et qui ne permettent qu'un débit d'extraction très limité. Toutefois, comme cet essai exige un puisage manuel intensif de d'eau pendant 10 minutes, il n'est bien adapté qu'aux forages où l'eau est à moins de 15 à 20 m de la surface. De plus, il n'est utilisable que dans des forages, par opposition aux puits de grand diamètre, car le niveau d'eau doit être suffisamment abaissé pour pouvoir mesurer les changements de manière réaliste. Si l'aquifère est très perméable, le rabattement risque d'être trop faible et la remontée trop rapide pour pouvoir être enregistrés avec précision (quoique dans ce cas, l'essai aura tout de même montré que

le forage peut alimenter une pompe manuelle). Une analyse plus détaillée des résultats d'un essai de puisage permet de déterminer la transmissivité de l'aquifère, mais elle nécessite un programme informatique et n'est pas abordée ici.

## Équipement

Pour effectuer un essai de puisage, l'équipement nécessaire, illustré à la figure D.1, est le suivant :

- deux tubes à clapet pour puiser l'eau dans le forage. Un tube à clapet est un long seau cylindrique qui peut facilement être introduit dans le forage et qui prélèvera de 4 à 5 litres à chaque puisage. Un atelier local peut fabriquer aisément un tel récipient avec un tube d'acier. Le volume du tube peut être calculé à l'aide de la formule  $\pi r^2 h$  (où  $\pi$  est 3,14,  $r$  le rayon interne et  $h$  la longueur du tube). Par exemple, un tube à clapet ayant un diamètre interne de 75 mm et une longueur de 1 m aurait un volume de 4,4 litres. Une corde d'env. 20 m doit être fixée à la partie supérieure du tube.
- Un chronomètre pour mesurer le temps de puisage et de remontée.
- Une sonde piézométrique pour mesurer les niveaux d'eau.
- Un carnet, ou un formulaire standard, et un crayon pour consigner et analyser les données de l'essai.

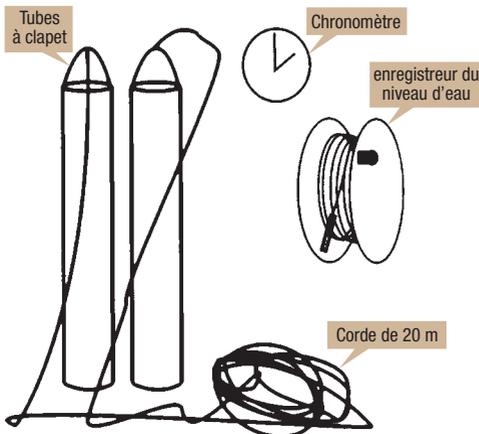


Figure D.1 : Équipement pour l'essai de puisage  
MacDonald *et al* (2008)

## Déroulement de l'essai de puisage

Une fois que l'équipement est prêt et que les différentes tâches ont été attribuées, l'essai se déroule de la façon suivante :

1. Choisissez un point de référence (par ex. le bord supérieur du tubage) à partir duquel tous les relevés du niveau d'eau seront effectués, et mesurez le niveau d'eau résiduel. Le niveau doit être stable avant le début de l'essai, donc celui-ci ne doit pas être réalisé un jour où le forage est pompé ou développé.
2. Le tube A est descendu dans le forage et immergé. Le chronomètre est enclenché au moment où le tube A est plein et commence à être remonté. Pendant que le tube A est vidé, le tube B est descendu rapidement dans le forage et remonté dès qu'il est plein. En utilisant alternativement les deux tubes, cette procédure se poursuit pendant 10 minutes, ce qui devrait permettre de 20 à 50 puisages (selon la distance jusqu'à la surface de l'eau). L'objectif à viser devrait être de 40 puisages en 10 minutes (un toutes les 15 secondes) ; les résultats sont plus précis si le rythme de puisage est relativement constant pendant tout l'essai. Les personnes qui puisent doivent accorder leur rythme, afin que celui-ci ne soit pas trop rapide au début et ne ralentisse pas lorsque le niveau de l'eau baisse et qu'elles se fatiguent. Il faut compter attentivement le nombre de prélèvements effectués pendant les 10 minutes de puisage et les enregistrer. Le puisage doit s'arrêter après exactement 10 minutes.
3. À l'arrêt du puisage, l'heure est notée immédiatement (ou le chronomètre est redémarré) et le niveau d'eau est mesuré avec la sonde piézométrique toutes les 15 secondes pendant 10 minutes, puis toutes les 30 secondes pendant 20 minutes. Vous trouverez ci-dessous un formulaire standard pour consigner les données de l'essai de puisage. Assurez-vous que toutes les informations nécessaires sont notées (en plus des niveaux d'eau), notamment le volume des tubes à clapet et le nombre de puisages effectués.

## Analyse et interprétation

La méthode d'analyse présentée ici permettra de déterminer si le forage est susceptible de maintenir un rendement de 8 à 10 m<sup>3</sup> par jour. L'analyse et l'interprétation des résultats de l'essai comportent les étapes suivantes :

1. Convertissez les niveaux d'eau mesurés en rabattements, en soustrayant le niveau d'eau résiduel (une colonne est prévue sur le formulaire pour les rabattements calculés)
2. Déterminez le rabattement maximum ( $S_{max}$ ), qui est calculé au moyen du premier niveau d'eau mesuré après l'arrêt du puisage.
3. En utilisant le formulaire figurant sur la dernière page de cette annexe, calculez le volume d'eau total extrait du forage pendant l'essai et le débit moyen de puisage.
4. Calculez  $s_{50}$ , qui est la moitié du rabattement maximal ( $s_{50} = S_{max}/2$ ); calculez aussi  $s_{75}$ , qui est le rabattement lorsque le niveau d'eau est remonté à un quart du rabattement maximal ( $s_{75} = S_{max}/4$ ).
5. Regardez dans les données enregistrées à quel moment sont survenus  $s_{50}$  et  $s_{75}$  (que l'on désignera par  $t_{50}$  et  $t_{75}$  respectivement).
6. Mesurez ou estimez le diamètre du forage. Si le forage est un trou ouvert ou tubé, mais sans massif filtrant, le diamètre est le diamètre creusé. Si le forage est déjà équipé d'un massif filtrant, le diamètre effectif se situe entre le diamètre du tubage et le diamètre creusé. La porosité du gravier étant généralement proche de 30 %, le diamètre peut être estimé par le calcul suivant :  $0,3 \times (\text{diamètre creusé} - \text{diamètre du tubage}) + \text{diamètre du tubage}$ .
7. Utilisez le débit de pompage et le diamètre effectif du forage pour trouver les valeurs de référence correctes dans le tableau D.1 ci-dessous. Si les valeurs de  $S_{max}$ ,  $t_{50}$  et  $t_{75}$  calculées sur la base de l'essai sont toutes inférieures aux valeurs de référence du tableau, le forage est susceptible de maintenir un rendement de 8 à 10 m<sup>3</sup> par jour. Si les valeurs calculées sont toutes supérieures aux valeurs de référence, il est peu probable que

le forage puisse maintenir ce rendement (mais il peut néanmoins être une source d'eau utile si un rendement inférieur est acceptable). Si certaines des valeurs calculées sont supérieures et d'autres inférieures aux valeurs de référence, ou si elles sont très proches des valeurs de référence, il serait souhaitable de tester à nouveau le forage, par un essai à débit constant.

**Tableau D.1** Valeurs de référence pour l'analyse de l'essai de puisage – 8 à 10 m<sup>3</sup> par jour

Diamètre du forage	Débit de pompage (litres par minute) :	7	10,5	14	17,5	21
100 mm	Rabattement maximal, $s_{max}$ (m)	2,54	3,81	5,08	6,35	7,62
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	6	6	6	6	6
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	11	11	11	11	11
125 mm	Rabattement maximal, $s_{max}$ (m)	2,22	3,33	4,43	5,54	6,64
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	7	7	7	7	7
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	16	16	16	16	16
150 mm	Rabattement maximal, $s_{max}$ (m)	1,89	2,84	3,78	4,73	5,67
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	9	9	9	9	9
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	21	21	21	21	21
200 mm	Rabattement maximal, $s_{max}$ (m)	1,35	2,03	2,71	3,39	4,06
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	17	17	17	17	17
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	35	35	35	35	35

(Les auteurs sont reconnaissants à MacDonald d'avoir recalculé les valeurs de référence pour un seuil de 10 m<sup>3</sup> par jour)

**Tableau D.2** Valeurs de référence pour l'analyse de l'essai de puisage – 5 m<sup>3</sup> par jour

Diamètre du forage	Débit de pompage (litres par minute):	7	10,5	14	17,5	21
100 mm	Rabatement maximal, $s_{max}$ (m)	3,5	5,3	7,1	8,8	10,6
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	6	6	6	6	6
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	14	14	14	14	14
125 mm	Rabatement maximal, $s_{max}$ (m)	2,9	4,3	5,7	7,1	8,5
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	9	9	9	9	9
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	21	21	21	21	21
150 mm	Rabatement maximal, $s_{max}$ (m)	2,3	3,4	4,6	5,7	6,9
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	12	12	12	12	12
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	28	28	28	28	28
200 mm	Rabatement maximal, $s_{max}$ (m)	1,5	2,3	3,1	3,8	4,6
	Durée d'une remontée de moitié, $t_{50}$ (minutes)	19	19	19	19	19
	Durée d'une remontée de trois-quart, $t_{75}$ (minutes)	46	47	47	47	47

Le tableau D.2 fournit des valeurs de référence indiquant si un forage est susceptible de maintenir un rendement de 5 m<sup>3</sup> par jour.

Si les valeurs  $s_{max}$ ,  $t_{50}$  et  $t_{75}$  sont toutes inférieures aux valeurs figurant dans ces tableaux, le forage sera vraisemblablement une réussite.

Si les valeurs  $s_{max}$ ,  $t_{50}$  et  $t_{75}$  sont toutes bien supérieures aux valeurs de ces tableaux, le forage a peu de chances de réussite.

Si certaines valeurs sont supérieures, d'autres inférieures, envisagez d'effectuer un essai à débit constant.

## Formulaire pour les données de l'essai de puisage

Nom du forage :	Emplacement du forage :
Date de l'essai :	Nom de la personne remplissant le formulaire :
Niveau d'eau résiduel (m au-dessous du point de référence) :	Heure du début de l'essai :
Durée du puisage (en principe 10 minutes) :	Nombre de tubes prélevés :

Temps écoulé depuis l'arrêt du puisage (minutes)	Niveau d'eau (m au-dessous de la référence)	Rabatement calculé (m)	Temps écoulé depuis l'arrêt du puisage (minutes)	Niveau d'eau (m au-dessous de la référence)	Rabatement calculé (m)	Temps écoulé depuis l'arrêt du puisage (minutes)	Niveau d'eau (m au-dessous de la référence)	Rabatement calculé (m)
0,25			8			20		
0,5			8,25			20,5		
0,75			8,5			21		
1			8,75			21,5		
1,25			9			22		
1,5			9,25			22,5		
1,75			9,5			23		
2			9,75			23,5		
2,25			10			24		
2,5			10,5			24,5		
2,75			11			25		
3			11,5			25,5		
3,25			12			26		
3,5			12,5			26,5		
3,75			13			27		
4			13,5			27,5		
4,25			14			28		
4,5			14,5			28,5		
4,75			15			29		
5			15,5			29,5		
5,25			16			30		
5,5			16,5					
5,75			17					
6			17,5					
6,25			18					
6,5			18,5					
6,75			19					
7			19,5					

## Formulaire de calcul et d'interprétation pour l'essai de puisage

Nom du forage :	Emplacement du forage :
Date de l'essai :	Nom de la personne remplissant le formulaire :
<b>Procédure de calcul</b>	
A = Nombre total de tubes prélevés	
B = Volume de chaque tube (litres)	
C = Volume total de l'eau prélevée ( $A \times B$ ) (litres)	
D = Durée de la période de puisage (minutes)	
E = Débit moyen de puisage pendant l'essai ( $C \div D$ ) (litres par minute)	
$s_{max}$ = Rabattement maximal (premier rabattement après l'arrêt du puisage) (m)	
$s_{50}$ = Moitié du rabattement maximal (50 % de remontée) ( $s_{max} \div 2$ ) (m)	
$t_{50}$ = Heure à laquelle le niveau est remonté à $s_{50}$ (minutes depuis l'arrêt du puisage)	
$s_{75}$ = Quart du rabattement maximal (75 % de remontée) ( $s_{max} \div 4$ ) (m)	
$t_{75}$ = Heure à laquelle le niveau est remonté à $s_{75}$ (minutes depuis l'arrêt du puisage)	
<b>Diamètre du forage (mm)</b> Utilisez le diamètre foré si l'on n'a pas installé de crépine et de massif filtrant. Calculez le diamètre effectif s'il y a un massif filtrant ; dans ce cas, si le diamètre du tubage est F et le diamètre foré est G, le diamètre effectif approximatif serait : $0,3(G - F) + F$	

Pour savoir quels sont le débit de puisage et le diamètre appropriés, comparez les valeurs calculées de  $s_{max}$ ,  $t_{50}$  et  $t_{75}$  avec les valeurs du tableau ci-dessus.

**Annexe G** Liste de contrôle pour la supervision des entrepreneurs

No.	Points à contrôler	Notes
<b>INFORMATIONS GÉNÉRALES</b>		
1	<b>Certification</b> : L'entrepreneur peut-il fournir la preuve de ses qualifications techniques et de l'enregistrement de son entreprise ?	
2	<b>Réputation</b> : Y a-t-il des raisons de penser que l'entrepreneur a la réputation de ne pas être fiable et d'avoir des pratiques peu sûres ?	
3	<b>Santé et sécurité</b> : L'entrepreneur fournit-il un équipement de sécurité adéquat (casques, bottes de sécurité, etc.) ?	
4	<b>Formation</b> : Toute l'équipe utilisée par l'entrepreneur a-t-elle été correctement formée pour effectuer des essais de pompage ?	
5	<b>Entretien</b> : Est-ce que tout l'équipement est régulièrement entretenu, utilisé correctement et maintenu en bon état ?	
6	<b>Hygiène</b> : L'entrepreneur fait-il en sorte que l'équipe ait de bonnes pratiques d'hygiène ?	
7	<b>Propreté</b> : Tout l'équipement est-il nettoyé adéquatement, surtout après avoir été utilisé dans de l'eau contaminée ?	
8	<b>Fuites</b> : Du matériel est-il prévu (bacs collecteurs ou matelas absorbants) pour recueillir les fuites et les déversements accidentels ?	
9	<b>Stockage du carburant</b> : Le carburant et les autres substances dangereuses sont-ils stockés correctement à une distance suffisante du forage ?	
10	<b>Sous-traitance</b> : L'entrepreneur a-t-il sous-traité une partie des travaux ? Est-ce acceptable ?	
<b>PRÉPARATIFS DE L'ESSAI</b>		
11	<b>Objectifs</b> : Des objectifs clairs ont-ils été définis pour l'essai ? Quelles informations souhaitez-vous tirer de l'essai ?	
12	<b>Informations générales</b> : Avez-vous rassemblé des informations sur la géologie, le forage, l'historique des niveaux d'eau, etc. ?	
13	<b>Identité du forage</b> : L'entrepreneur a-t-il confirmé que l'essai est réalisé dans le bon forage ?	
14	<b>Type d'essai</b> : Êtes-vous au clair sur le type d'essai, ou la séquence d'essais, qui doit être réalisé ?	
15	<b>Observation des niveaux d'eau</b> : La sonde piézométrique est-elle en bon état, fonctionne-t-elle correctement ? Avez-vous besoin d'une sonde de réserve ?	
16	<b>Point de référence</b> : Avez-vous défini et approuvé un point de référence pour mesurer les niveaux d'eau ?	
17	<b>Débit de pompage</b> : Disposez-vous d'un moyen adéquat pour mesurer le débit de pompage ? Est-il étalonné ?	
18	<b>Autres observations</b> : Quels autres paramètres ou caractéristiques de l'eau faut-il observer ?	
19	<b>Formulaires standard</b> : Avez-vous suffisamment d'exemplaires des formulaires standard pour enregistrer les résultats de l'essai ?	
20	<b>Autres forages</b> : Y a-t-il d'autres forages dans le voisinage qui pourraient avoir une influence sur l'essai si des pompages y sont effectués ?	
21	<b>Accès</b> : La tête de forage laisse-t-elle un accès pour l'équipement d'observation ?	
22	<b>Qualité de l'eau</b> : Le cas échéant, y a-t-il un endroit approprié pour prélever des échantillons d'eau ?	
23	<b>Microbiologie</b> : Le cas échéant, des échantillons d'eau peuvent-ils être gardés au frais jusqu'à ce que l'analyse microbiologique ait lieu ?	
24	<b>Alimentation en énergie</b> : Une alimentation adéquate est-elle disponible ? À quel point est-elle fiable ?	
25	<b>Générateur</b> : Si un générateur est utilisé, disposez-vous de suffisamment de carburant pour toute la période de pompage ?	

No.	Points à contrôler	Notes
26	<b>Colonne de refoulement :</b> La colonne de refoulement est-elle équipée d'un clapet de pied ? La colonne peut-elle encore être enlevée facilement ?	
27	<b>Vannes :</b> Une vanne a-t-elle été mise en place pour contrôler le débit de pompage ?	
28	<b>Évacuation :</b> L'eau peut-elle être évacuée sans perturber l'essai (par une remise dans le circuit) ?	
29	<b>Utilisation de l'eau :</b> Des mesures ont-elles été prises pour que l'eau déversée ne soit pas gaspillée ?	
30	<b>Essai de l'équipement :</b> Tout l'équipement a-t-il été testé après avoir été mis en place ? Fonctionne-t-il correctement ?	
31	<b>Profondeur de captage de la pompe :</b> L'admission de la pompe a-t-elle été placée bien au-dessous du niveau d'eau le plus bas prévu pendant l'essai ?	
32	<b>Contamination :</b> Le forage est-il protégé de telle sorte que de l'eau polluée n'y pénètre pas pendant l'essai ?	
33	<b>Sécurité publique :</b> Des mesures ont-elles été prises pour que la population (surtout les enfants) n'ait pas accès aux zones de travaux ?	
34	<b>Niveau d'eau résiduel :</b> A-t-il été mesuré juste avant l'essai ? Le niveau d'eau était-il stable à ce moment-là ?	
35	<b>Fréquence des observations :</b> La fréquence des mesures du niveau d'eau et d'autres paramètres est-elle bien comprise ?	

#### ESSAI PAR PALIERS

36	<b>Nombre et durée des paliers :</b> Pour un essai par paliers, a-t-on convenu du nombre de paliers et de la durée de chacun d'entre eux ?	
37	<b>Débit de pompage :</b> Des débits de pompage cibles pour chaque palier ont-ils été décidés et testés avant l'essai ?	
38	<b>Interruptions :</b> Y a-t-il eu des interruptions de pompage pendant les paliers ? Si oui, pour quelles raisons ?	

#### ESSAI À DÉBIT CONSTANT

39	<b>Débit de pompage :</b> Un débit de pompage cible a-t-il été décidé et testé avant l'essai ?	
40	<b>Débit constant :</b> Le débit de pompage a-t-il été relativement constant pendant toute la durée du pompage ?	
41	<b>Interruptions :</b> Y a-t-il eu des interruptions de pompage pendant l'essai ? Si oui, pour quelles raisons ?	

#### ESSAI DE REMONTÉE

42	<b>Clapet de pied et colonne de refoulement :</b> Le niveau d'eau a-t-il été influencé par l'absence d'un clapet de pied ou avant l'enlèvement de la pompe ?	
----	--	--

#### APRÈS L'ESSAI

43	<b>Contamination :</b> Le forage a-t-il été sécurisé (afin que des objets, des animaux ou de l'eau polluée ne puissent pas y pénétrer) ?	
44	<b>Qualité des données :</b> Tous les formulaires standard ont-ils été complétés, comprennent-ils toutes les informations nécessaires ?	
45	<b>Fin d'essai :</b> Avez-vous vérifié que l'essai est terminé et que tout l'équipement peut être retiré ?	
46	<b>Analyse de l'essai :</b> L'entrepreneur a-t-il utilisé des méthodes appropriées pour analyser les données de l'essai ?	
47	<b>Suivi à long terme :</b> Un plan a-t-il été élaboré pour l'observation à long terme de ce forage ?	
48	<b>Accès :</b> Des mesures ont-elles été prises pour assurer un accès aisé lors d'observations futures ?	
49	<b>Archivage :</b> Les données de l'essai, les rapports et autres notes ont-ils été copiés et archivés de manière sûre ?	

## Suggestions d'énoncés à inclure dans le cahier des charges d'un entrepreneur

Ce tableau contient la plupart des questions figurant dans la liste ci-dessus, reformulées pour pouvoir être insérées dans le cahier des charges ou le contrat élaboré pour l'entrepreneur effectuant les essais de pompage. Elles ne s'appliquent pas toutes à chaque situation, donc faites un copier-coller selon vos besoins.

### INFORMATIONS GÉNÉRALES

**Certification :** des preuves des qualifications techniques et de l'enregistrement de l'entreprise (telles que copies du certificat d'enregistrement) doivent être fournies.

**Santé et sécurité :** un équipement de sécurité adéquat (par ex. des casques, des bottes de sécurité, etc.) doit être fourni à tous les travailleurs qui participent aux essais de pompage.

**Formation :** toute l'équipe utilisée par l'entrepreneur doit avoir été correctement formée pour effectuer des essais de pompage.

**Entretien :** tout l'équipement utilisé lors des essais doit être régulièrement entretenu, utilisé correctement et maintenu en bon état.

**Hygiène :** des installations sanitaires adéquates doivent être mises à disposition de l'équipe des essais de pompage, qui doit avoir de bonnes pratiques d'hygiène, afin de ne pas contaminer la réserve d'eau.

**Propreté :** tout l'équipement doit être nettoyé correctement avant l'essai de pompage, surtout s'il a été utilisé auparavant dans de l'eau contaminée.

**Fuites :** un matériel approprié, tel que bacs collecteurs ou matelas absorbants devrait être fourni pour recueillir les fuites et les déversements de carburant ou d'autres substances dangereuses.

**Stockage du carburant :** le carburant et les autres substances dangereuses doivent être stockés correctement à une distance suffisante du forage testé et des autres sources d'eau de cette zone.

**Sous-traitance :** l'entrepreneur ne peut pas sous-traiter une partie des travaux sans autorisation écrite.

## PRÉPARATIFS DE L'ESSAI

**Identité du forage :** l'entrepreneur devrait confirmer que l'essai est réalisé dans le bon forage, surtout s'il y a plusieurs forages dans le voisinage.

**Observation des niveaux d'eau :** le matériel utilisé pour observer les niveaux d'eau, tel que sondes piézométriques et capteurs de pression, doivent être en bon état et fonctionner correctement.

**Point de référence :** le point de référence utilisé pour mesurer les niveaux d'eau doit être clairement défini et consigné.

**Débit de pompage :** l'entrepreneur doit définir la méthode à utiliser pour mesurer le débit de pompage et les procédures à suivre (par ex. étalonnage) pour que les mesures soient précises.

**Formulaires standard :** lorsque c'est possible, les données des essais devraient être consignées sur des formulaires standard, pour faciliter leur conservation et l'analyse des essais.

**Qualité de l'eau :** le cas échéant, un endroit approprié pour prélever des échantillons d'eau devrait être prévu dans le système de refoulement.

**Microbiologie :** si des échantillons sont prélevés pour des analyses microbiologiques, des installations devraient être fournies pour garder les échantillons à la bonne température jusqu'à ce qu'ils puissent être envoyés dans un laboratoire (à moins que l'analyse ne soit faite avec un kit de terrain).

**Générateur :** si un générateur est utilisé, il faut prévoir suffisamment de carburant pour la durée totale de la période de pompage, afin qu'il n'y ait pas d'interruption du pompage.

**Colonne de refoulement :** si un essai de remontée doit être effectué, il faut que la colonne de refoulement soit équipée d'un clapet de pied.

**Vannes :** un moyen adéquat de régler le débit de pompage, tel qu'une vanne, doit être fourni.

**Évacuation :** l'eau pompée pendant l'essai devrait être évacuée à une distance suffisante du forage, afin qu'elle ne retourne pas dans le circuit et n'influence pas les résultats de l'essai, et de telle sorte qu'elle ne provoque pas d'inondation.

**Utilisation de l'eau :** sur demande, il faudrait prendre des mesures pour que l'eau évacuée puisse être utilisée par la population locale plutôt que d'être gaspillée.

**Essai de l'équipement:** une fois installé, tout l'équipement doit être testé pour s'assurer qu'il fonctionne correctement.

**Profondeur de captage de la pompe:** l'admission de la pompe doit être placée bien au-dessous du niveau d'eau le plus bas prévu pendant l'essai.

**Contamination:** le forage devrait être protégé afin que de l'eau polluée n'y pénètre pas pendant l'essai.

**Sécurité publique:** des mesures devraient être prises pour empêcher tout accès de la population (surtout des enfants) sur le site des travaux.

**Niveau d'eau résiduel:** le niveau d'eau résiduel doit être mesuré et enregistré juste avant l'essai.

### PENDANT L'ESSAI

**Durée de l'essai:** le pompage doit se poursuivre pendant le temps convenu (aussi pour les différents paliers d'un essai par paliers), à moins que le superviseur de l'essai ne donne d'autres instructions à l'entrepreneur.

**Débits de pompage:** le pompage doit être maintenu au débit convenu ou en être proche (aussi pour les différents paliers d'un essai par paliers), à moins que le superviseur de l'essai ne donne d'autres instructions à l'entrepreneur.

**Observation:** des paramètres tels que le débit de pompage et le niveau d'eau doivent être mesurés aux intervalles convenus à moins que le superviseur de l'essai ne donne d'autres instructions à l'entrepreneur.

**Interruptions:** l'entrepreneur doit informer le superviseur de toute interruption du pompage ou des relevés, indiquer les raisons des interruptions et leur durée.

### APRÈS L'ESSAI

**Contamination:** le forage doit être sécurisé, afin que des objets étrangers, des animaux ou de l'eau polluée ne puissent pas y pénétrer.

**Qualité des données:** les formulaires standard doivent être remplis clairement et lisiblement, contenir toutes les informations nécessaires, et être remis au superviseur de l'essai.

**Fin d'essai:** l'équipement et l'équipe ne sont retirés que lorsque le superviseur s'est assuré que les essais ont été réalisés correctement.

**Archivage:** les données de l'essai, les relevés et autres notes doivent être copiés et archivés de manière sûre.

## **MISSION**

Organisation impartiale, neutre et indépendante, le Comité international de la Croix-Rouge (CICR) a la mission exclusivement humanitaire de protéger la vie et la dignité des victimes de conflits armés et d'autres situations de violence, et de leur porter assistance. Le CICR s'efforce également de prévenir la souffrance par la promotion et le renforcement du droit et des principes humanitaires universels. Créé en 1863, le CICR est à l'origine des Conventions de Genève et du Mouvement international de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, dont il dirige et coordonne les activités internationales dans les conflits armés et les autres situations de violence.



CICR